

# ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»

№ 2 (61), 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

**Нежметдинов Р.А., Ковалев И.А., Котырова Ш., Путинцева Е.В.**

Практические аспекты анализа лог-файлов технологического оборудования на примере набора данных “Mill Data Set” ..... 8

**Мешков В.Г.**

Определение показателей научно-технического уровня интегрированных автоматизированных систем управления..... 15

**Глубокова С.В., Ковалев А.В.**

Методики измерения отклонения от соосности на кругломере ..... 19

**Дьяченко Е.П., Рыбаков А.В.**

Перспективы развития модульной методологии разработки управляющих программ для станков с ЧПУ с применением «домика качества» на примере операций гравирования ..... 24

**Феофанов А.Н., Соболев А.Н., Белоцкий А.С.**

Универсальный алгоритм САD-моделирования некруглых зубчатых колес по функции передаточного отношения ..... 28

**Иванов В.М.**

Имитационная модель сферической обработки на токарном станке с ЧПУ..... 32

**Сосенушкин С.Е., Юсеф Ф.**

Методика обеспечения интероперабельности беспроводных сенсорных сетей на основе унификации форматов кадров ..... 38

### РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**Зеленский А.А.**

Комплексная методология синтеза быстродействующих доверенных систем управления движением промышленных роботов и мехатронных систем  
*Часть 1. Модели решения проблемы и комплексная методология синтеза систем управления движением промышленных роботов и мехатронных систем* ..... 43

**Ситников А.В., Курганов В.В., Трохова А.Н.**

Применение аппаратно-программных средств для создания системы сканирования трёхмерных объектов..... 51

**Панфилов П.В., Морозов В.В.**

Повышение точности твердотельных лазерных дальномеров путем первичной обработки данных ..... 56

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ****Бровкова М.Б., Бушуев В.В., Молодцов В.В.**

Цифровые двойники технологических систем: состояние вопроса, специфика реализации и использования, перспективы ..... 61

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ****Седых М.И., Карташев Д.И.**

Поиск оптимального технологического решения при изготовлении деталей машин..... 69

**ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ****Толмачев Н.С., Анненков И.Ф.**

Исследование трехстадийной схемы штамповки выдавливанием ..... 74

**СОБЫТИЯ И ДАТЫ**

Председатель Правительства РФ Мишустин М.В. и Заместитель Председателя Правительства Чернышенко Д.Н. посетили выставку «Цифровая индустрия промышленной России» (ЦИПР-2022)..... 79

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» — опорный вуз ракетно-космической отрасли ..... 80

# VESTNIK MSUT «Stankin»

№ 2 (61), 2022

## CONTENTS

### AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS

**Nezhmetdinov R.A., Kovalev I.A., Kotyrova Sh., Putintseva E.V.**

Practical aspects of the analysis of technological equipment log files on the example of the “Mill Data Set” ..... 8

**Meshkov V.G.**

Determination of indicators of the scientific and technical level of integrated automated control systems ..... 15

**Glubokova S.V., Kovalev A.V.**

Methods of measuring coaxiality deviations on a form measuring machine ..... 19

**Diyachenko E.P., Rybakov A.V.**

Prospects for the development of a modular methodology for the development of control programs for CNC machines with the use of a «house of quality» on the example of engraving operations..... 24

**Feofanov A.N., Sobolev A.N., Belotskiy A.S.**

A universal CAD-algorithm for modeling non-circular gears by the gear ratio function ..... 28

**Ivanov V.M.**

Simulation model of spherical processing on a CNC lathe..... 32

**Sosenushkin S.E., Yousef F.**

Methodology for ensuring the interoperability of wireless sensor networks based on the unification of frame formats ..... 38

### ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

**Zelensky A.A.**

Complex synthesis methodology of high-speed trusted industrial motion control systems of robots and mechatronic systems

*Part 1. Problem solving models and integrated methodology of synthesis of motion control systems of industrial robots and mechatronic systems* ..... 43

**Sitnikov A.V., Kurganov V.V., Trohova A.N.**

Application of hardware and software to create a system for scanning three-dimensional objects..... 51

**Panfilov P.V., Morozov V.V.**

Increasing the Accuracy of Solid State Laser Rangefinders through Primary Data Processing ..... 56

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

**Brovkova M.B., Bushuev V.V., Molodtsov V.V.**

Digital twins of technological systems: state of the art review, specifics of implementation and use, prospects ..... 61

## TECHNOLOGY OF MACHINE BUILDING

**Sedykh M.I., Kartashev D.I.**

Search for the optimal technological solution in the manufacture of machine parts ..... 69

## TECHNOLOGIES AND MACHINES OF PROCESSING BY PRESSURE

**Tolmachev N.S., Annenkov I.F.**

Research of tree-stage extrusion stamping scheme ..... 74

## EVENTS AND DATES

Prime Minister of the Russian Federation Mishustin M.V. and Deputy Prime Minister Chernyshenko D.N. visited the exhibition «Digital Industry of Industrial Russia» (CIPR-2022) ..... 79

STANKIN Moscow State Technical University — the main university of the rocket and space industry.....80

---

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

---

УДК 62-50:004.057.8

Р.А. Нежметдинов, И.А. Ковалев, Ш. Котырова, Е.В. Путинцева  
R.A. Nezhmetdinov, I.A. Kovalev, Sh. Kotyrova, E.V. Putintseva

## ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ЛОГ-ФАЙЛОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ НАБОРА ДАННЫХ “MILL DATA SET”

### PRACTICAL ASPECTS OF THE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT LOG FILES ON THE EXAMPLE OF THE “MILL DATA SET”

*В статье представлен способ использования специализированного стека программных решений для сбора, хранения и централизованного управления лог-файлами технологического оборудования. Исследования способа анализа данных технологического оборудования были проведены на основе открытого набора данных, представленных исследовательским центром NASA Ames.*

*The article presents a way to use a specialized stack of software solutions for collecting, storing and centrally managing log files of technological equipment. Investigations into the process technological equipment data analysis method were carried out on the basis of an open dataset provided by the NASA Ames Research Center.*

**Ключевые слова:** сбор данных, web-технологии, лог-файлы, ELK, визуализация данных, анализ данных.

**Keywords:** data collection, web technologies, log files, ELK, data visualization, data analysis.

#### Введение

Сбор данных с технологического оборудования является одной из важных задач на промышленных предприятиях, а также при проведении исследовательских работ. Для производства отслеживание разнообразных диагностических данных и своевременное получение информации о работе или сбоях оборудования позволяет незамедлительно реагировать на внештатные ситуации, предпринимать действия по сокращению простоев и продлить срок службы оборудования [1, 2].

Для того, чтобы обеспечить производительность систем, инженеры проводят анализ различных типов данных, генерируемых системами управления в процессе их функционирования [3]. В качестве источника данных о работе технологического оборудования, используемого для дальнейшего анализа, могут служить файлы о событиях, созданных станками с ЧПУ – лог-файлы, которые формируются в виде текста. Основываясь на информации о процессах, предоставленной в лог-файлах, можно отслеживать параметры

системы, выявлять нерегулярные ситуации или получать иную информацию (например, время работы оборудования, данные о состоянии станка), которая может оказаться полезной при анализе причин отказов. Однако, в необработанном виде работа с лог-файлами становится трудозатратной задачей из-за отсутствия возможности осуществления поиска и фильтрации данных, которые имеют неструктурированный вид. Вследствие этого, создание системы агрегации, управления и отображения лог-файлов для представления технологической информации на более высокие уровни управления предприятием является актуальной задачей [4]. Для ее решения в статье предлагается способ использования набора специализированных программных инструментов, позволяющий осуществлять сбор, хранение и централизованное управление лог-файлами технологического оборудования.

#### **Инструментальные средства анализа неструктурированных технологических данных**

Сбор, хранение, обработка неструктурированных данных на производственной площадке является до-

рогостоящей задачей для большинства предприятий [5]. В связи с чем, при анализе существующих инструментов обработки лог-файлов, помимо технических характеристик, важно учитывать стоимость программных компонентов. В связи с этим для построения системы анализа лог-файлов был выбран программный стек ELK, который распространяется в том числе в виде open source решения. ELK — это аббревиатура из названий трех программных продуктов: Elasticsearch, Logstash, Kibana, разработанных и поддерживаемых компанией Elastic (США).

Ядро стека — это компонент Elasticsearch, представляющий собой базу данных с системой полнотекстового поиска и анализа, основанную на специализированной поисковой технологии Apache Lucene, благодаря которой Elasticsearch отличается от реляционных баз данных или NoSQL систем. В реляционных базах данных существуют такие понятия, как строки, столбцы, таблицы и схемы. Elasticsearch и подобные ей хранилища работают по иному принципу. Базовой единицей информации, хранимой в Elasticsearch является json-документ, представляющий собой текстовый формат обмена данными между клиентом и сервером. Как показано на рис. 1, документы хранятся внутри типов, а типы — внутри индексов. Индекс может содержать один или несколько типов, а каждый тип — огромное количество документов.

Структуру индексов в Elasticsearch можно сравнить со структурой базы данных в реляционных базах данных. Продолжая аналогию, тип в Elasticsearch соответствует таблице, а документ — записи в таблице (табл. 1).

Индексы разделяются на сегменты данных, и распределяются по узлам кластера. Узел — это единичный

сервер системы, который может быть частью большого кластера узлов. Кластер состоит из нескольких узлов, каждый из которых отвечает за хранение и управление своей частью данных (рис. 2). Elasticsearch — распределенная система, которая приспособлена к работе даже при неполадках оборудования, на котором она запущена. Для этого предусмотрены копии — реплики основных сегментов индекса. При наличии реплик, если первый узел выйдет из строя, то сегмент из данного узла все равно будет доступен в остальных двух узлах. Для того, чтобы обращаться к распределенной системе основных сегментов, существует координирующий узел, который получает поисковые запросы и далее отправляет переформулированные запросы узлам кластера.

Второй компонент стека — Logstash является агрегатором лог-файлов, который собирает данные из различных источников ввода, выполняет необходимые преобразования, а затем отправляет их в базу данных для дальнейшей обработки. Контейнер обработки событий в Logstash имеет три стадии: входа, фильтрации, выхода (рис. 3).

Обязательны лишь стадии вход и выход, фильтрация является опциональной частью. Стадия вход создает события, фильтры изменяют события входа, выходы отправляют их в пункт назначения. Контейнер Logstash хранится в конфигурационном файле. Секции конфигурационного файла: `input{}`, `filter{}`, `output{}` содержат одну или несколько конфигураций плагинов. Плагин ввода предназначен для настройки событий, передаваемые в Logstash. Плагин фильтра используется для модификации данных. Плагин вывода используется для отправки данных к месту назначения.



Рис. 1. Структура индекса в Elasticsearch

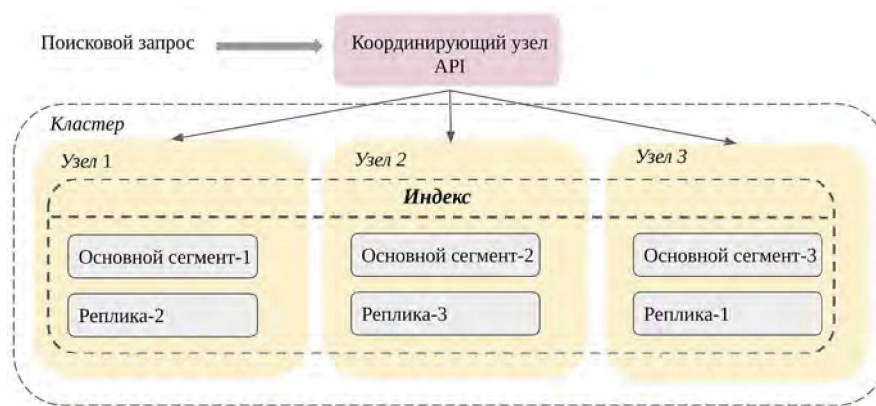


Рис. 2. Архитектура Elasticsearch

Таблица 1. Соответствие структурных элементов реляционных баз данных и Elasticsearch

Реляционная база данных	База данных	Таблица	Запись в таблице	Поле в таблице
Elasticsearch	Индекс	Тип	Документ (json)	Поле в документе

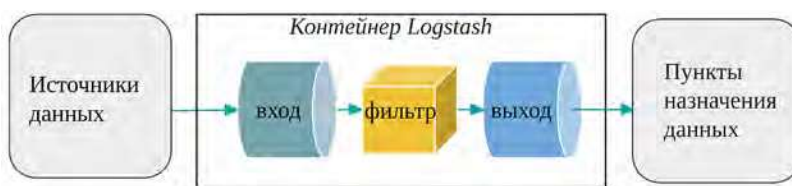


Рис. 3. Архитектура Logstash

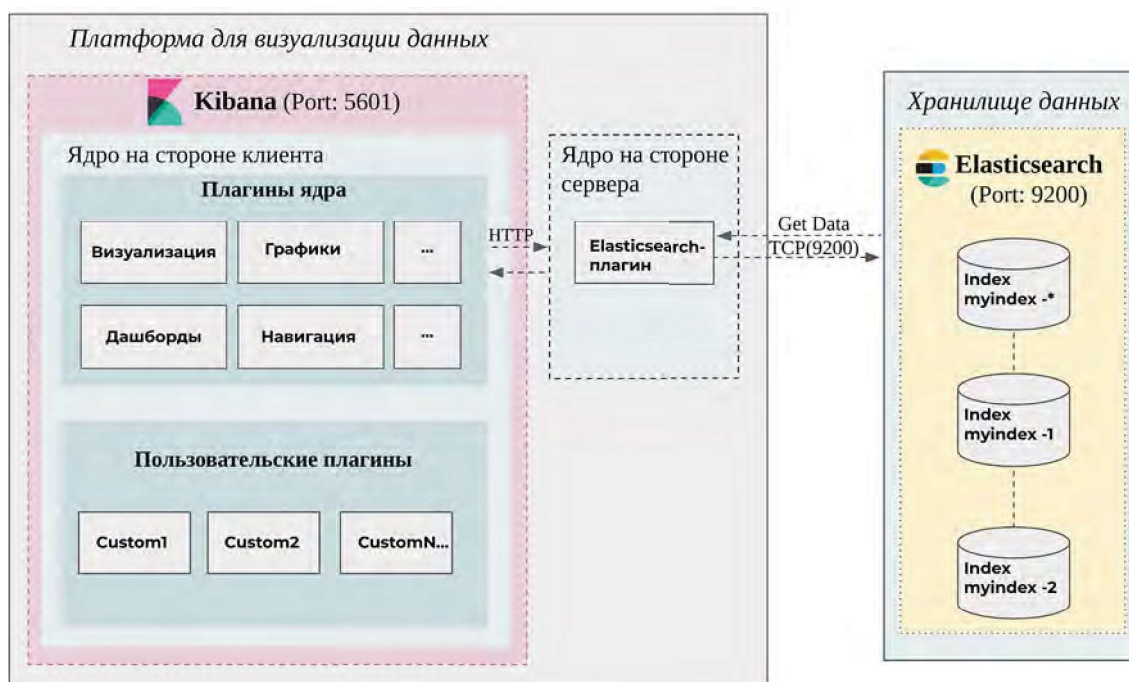


Рис. 4. Архитектура Kibana

Третий компонент стека Kibana, являющийся уровнем визуализации, работает поверх Elasticsearch, предоставляя пользователям возможность визуально представлять и анализировать данные. Kibana можно условно разделить на два основных модуля: модуль пользовательского интерфейса, определяющий графический пользовательский интерфейс, с которым обычно взаимодействуют пользователи и второй модуль – сервер, который передает данные из кластеров Elasticsearch в первый модуль через внутренний программный интерфейс приложения (англ. application program interface – API, рис. 4). Функции Kibana реализованы посредством программных модулей или плагинов ядра, которые содержат требуемую бизнес-логику.

Серверная часть Kibana связана с Elasticsearch и предоставляет внутренний программный интерфейс для использования модулей из пользовательского интерфейса. При получении пользователем доступа к Kibana посредством графического пользовательского интерфейса, модуль пользовательского интерфейса загружает все основные плагины, которые включают в себя необходимые функции Kibana.

Таким образом, с помощью представленного набора программных решений возможно осуществлять поиск, анализ, сбор и визуализацию данных. Для этого необходимо настроить Elasticsearch для поиска и анализа, Logstash – для сбора и Kibana – для визуализации данных [6].

**Структура единой платформы анализа технологических данных**

Интеграция отдельных компонентов в единую платформу для анализа лог-файлов технологического оборудования представлена на структурной схеме предлагаемой системы (рис. 5). Logstash-модули являются программным кодом и запускаются на одном платном компьютере. Далее производится чтение данных из лог-файла технологического оборудования, преобразование его к требуемому виду и дальнейшая отправка на сервер обработки данных. Преобразование лог-файлов происходит по заданному конфигурационному файлу в соответствии с необходимой структурой данных.

На сервере безопасность передачи данных осуществляется обратным прокси-сервером Nginx, производящим обработку SSL-соединения. Преобразо-

ванные данные передаются в базу данных Elasticsearch для хранения, поиска и анализа. Визуализация полученных данных осуществляется с помощью утилиты Kibana, которая предоставляет возможность создавать панели управления, состоящие из графиков, диаграмм и других вариантов визуализаций. На следующем этапе, при необходимости, возможна настройка мониторинга в режиме реального времени, добавление различных уведомлений, выведение отчетности по происходящим ошибкам.

Многоуровневая архитектура системы анализа лог-файлов представлена на рис. 6. На нижнем уровне располагается технологическое оборудование и интерфейсы связи с оборудованием. На уровне сервера располагается представляемая система, состоящая из трех компонентов: модуль сбора лог-файлов, сервер обработки данных и сервер предоставления данных. На верхнем уровне — устройства отображения информации.

### Анализ лог-файлов на примере набора данных “Mill Data Set”

Практическая реализация анализа лог-файлов с использованием представленного решения проводилась на основе открытых данных исследовательского центра NASA Ames [7]. Данные в указанном наборе представляют собой записи в файле — результаты запусков фрезерного станка при различных условиях эксплуатации (рис. 7). В частности, в процессе изучался износ инструмента при резании. Запуски производились при различных входных условиях (такие как, глубина резания, скорость подачи, обрабатываемый материал). При одних и тех же условиях, запуск оборудования продолжался до предела износа инструмента.

Исходные данные были организованы в виде файла текстового формата, предназначенного для представления табличных данных (формат CSV), состоящего из 14 полей и 167 записей. В полях записаны

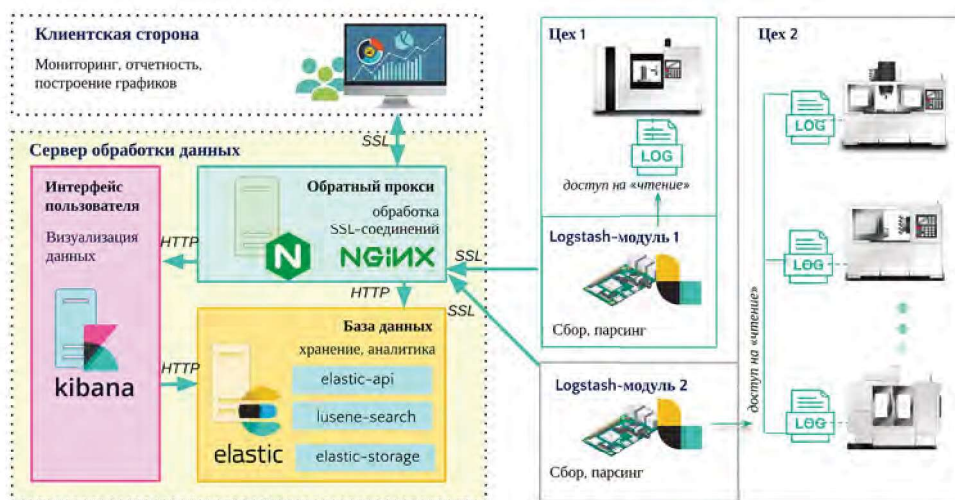


Рис. 5. Структурная схема системы анализа лог-файлов



Рис. 6. Многоуровневая архитектура системы анализа лог-файлов



Unnamed: 0	case	run	VB	time	DOC	feed	material	smcAC	smcDC	vib_table	vib_spindle	AE_table	AE_spindle
0	row_0	1	1	0.00	2	2	1	-0.017090	0.625000	0.078125	0.314941	0.087280	0.103760
1	row_1	1	2	0.00	4	2	1	0.307617	0.868945	0.075684	0.301514	0.086670	0.099487
2	row_2	1	3	0.00	6	2	1	-0.725098	0.913086	0.083008	0.295410	0.092773	0.104980
3	row_3	1	4	1.00	7	2	1	0.112305	0.131836	0.083008	0.316162	0.112915	0.139771
4	row_4	1	5	1.00	11	2	1	-0.122070	0.449219	0.107422	0.284424	0.095825	0.110474
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
162	row_162	16	2	NaN	2	2	2	-0.583496	1.308594	0.063477	0.330811	0.093994	0.109253
163	row_163	16	3	0.24	3	2	2	-0.200195	1.406250	0.065918	0.279541	0.114746	0.139771
164	row_164	16	4	NaN	4	2	2	0.244141	1.328125	0.063477	0.290527	0.101318	0.117798
165	row_165	16	5	0.40	6	2	2	-0.205078	1.381836	0.068359	0.289307	0.098877	0.114746
166	row_166	16	6	0.62	9	2	2	-0.380859	1.381836	0.041504	0.292969	0.075684	0.083008

167 rows x 14 columns

Рис. 7. Пример структуры данных для анализа

```

input {
  file {
    path => "/home/kotyrowashirin/milling-data/mill.csv"
    start_position => "beginning"
    sinedb_path => "/dev/null"
  }
}

filter {
  csv {
    separator => ","
    columns => ["row", "case", "run", "VB", "time", "DOC", "feed",
               "material", "smcAC", "smcDC", "vib_table", "vib_spindle", "AE_table", "AE_spindle"]
  }
}

mutate { convert => ["case", "integer"] }
mutate { convert => ["run", "integer"] }
mutate { convert => ["VB", "float"] }
mutate { convert => ["time", "integer"] }
mutate { convert => ["DOC", "float"] }
mutate { convert => ["feed", "float"] }
mutate { convert => ["material", "integer"] }
mutate { convert => ["smcAC", "float"] }
mutate { convert => ["smcDC", "float"] }
mutate { convert => ["vib_table", "float"] }
mutate { convert => ["vib_spindle", "float"] }
mutate { convert => ["AE_table", "float"] }
mutate { convert => ["AE_spindle", "float"] }
}

output {
  elasticsearch {
    hosts => "localhost"
    index => "mills"
    document_type => "data_mill"
  }
  stdout {}
}
    
```

Источник

Фильтрация и преобразование данных

Передача данных потребителю

Рис. 8. Вариант конфигурационного файла

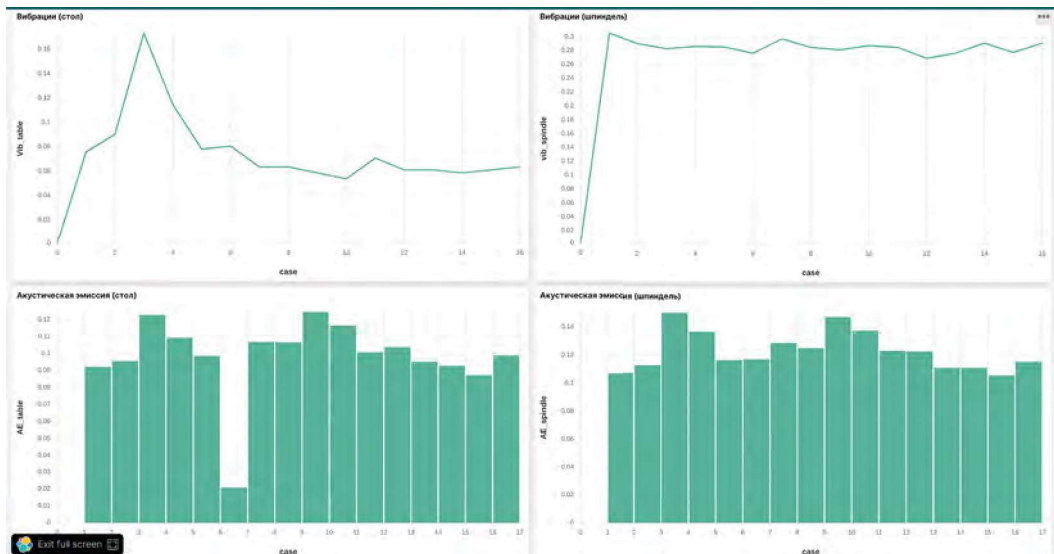


Рис. 9. Тестирование программного решения системы обработки лог-данных

данные о количестве запусков, об износе инструмента, а также данные, собранные разными типами датчиков (датчики тока, вибрации и акустической эмиссии).

Преобразование исходных данных из файла производилось по конфигурационному файлу (рис. 8), в котором настраивается конвейер обработки данных. Файл состоит из трех секций. В первой секции приведенной конфигурации содержится инструкция на считывание данных из файла, который находится по представленному адресу.

В следующей секции с помощью плагина фильтрации происходит сканирование каждой строки данных для их размещения. По умолчанию данный плагин использует символ «запятую» для разделения полей. Далее указана настройка конвертирования внутри секции фильтрации, которая изменяет тип данных полей, по умолчанию записанных в виде строк.

Плагин вывода в третьей секции используется для передачи событий из Logstash в Elasticsearch. Это не единственный способ такой передачи, но предпочтительный. Как только данные поступают в базу данных Elasticsearch, их можно использовать для визуализации в Kibana.

Для визуального анализа полученных данных на панели управления с помощью пользовательского интерфейса Kibana реализована интерфейсная сборка в виде линейных графиков и гистограмм, которые содержат: значения вибраций, сигналов акустической эмиссии стола и шпинделя при разных параметрах фрезерной обработки (рис. 9).

#### Заключение

Технологическое оборудование предоставляет в реальном времени массивы данных о процессе обработки, событиях, связанных с нерегулярными ситуациями. Все они, включая лог-файлы, представляют собой огромные наборы информации, анализ которых позволит оптимизировать технологических процесс [8, 9]. Однако, при большом объеме информации требуется автоматизированный подход к анализу данных [10]. Для решения указанной задачи в работе предложена программная система на основе стека ELK, которая осуществляет сбор лог-файлов с технологического оборудования из нескольких источников, хранение в одном централизованном хранилище, анализ и визуализацию данных. Компоненты в стеке программных решений разработаны для взаимодействия друг с другом без дополнительной настройки, а работа сервера обработки данных может быть осуществлена во внутренней сети предприятия.

#### Библиографический список

1. **Nikishechkin P., Kovalev I., Nikich A.** An approach to building a cross-platform system for the collection and processing of diagnostic information about working technological equipment for industrial enterprises // MATEC Web of Conferences. — 2017. — V. 129. — P. 03012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712903012>.
2. **Квашнин Д.Ю., Ковалёв И.А., Нежметдинов Р.А., Чекрыжов В.В.** Агрегирование информации о работе технологического оборудования с применением Industrial Internet of Things // Автоматизация в промышленности, № 5. 2019. с. 29–32.
3. **Евстафиева С.В., Пушков Р.Л., Саламатин Е.В.** Сбор и визуализация эксплуатационных данных с технологического оборудования // Автоматизация в промышленности, № 5. 2019. с. 26–28.
4. **Никишечкин П.А., Ковалев И.А., Григорьев А.С., Никич А.Н.** Кроссплатформенная система сбора и обработки диагностической информации о работе технологического оборудования // Вестник МГТУ Станкин. — 2017. — № 1 (40). — С. 34–56.
5. **Ковалев И.А., Нежметдинов Р.А., Червонова Н.Ю., Абдулов Р.Р.** Синтез систем удаленной диагностики и мониторинга работы станков с ЧПУ с применением Web-компонентов // Автоматизация в промышленности, № 5. 2021. с. 12–32.
6. **Котырова Ш., Нежметдинов Р.А.** Разработка автоматизированной системы анализа лог файлов технологического оборудования // Материалы XIV всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ — 2021)». Сборник докладов. — М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2021. — 387 с. с. 171–176.
7. **Agogino, A., & Goebel, K.** (2007). “Mill Data Set”, BESTlab, UC Berkeley. NASA Ames PrognosticsDataRepository, [<http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>], NASA Ames, Moffett Field, CA.
8. **Nikishechkin, P.A., Chervonnova, N.Y. and Nikich, A.N.** An approach of developing solution for monitoring the status and parameters of technological equipment for the implementation of Industry 4.0 // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (2020), (Vol. 709, No. 4, p. 044065).
9. **Мартинова Л.И., Козак Н.В., Ковалев И.А., Любимов А.Б.** Создание инструментария мониторинга здоровья станка для цифрового производства // Автоматизация в промышленности, № 5. 2020. с. 24–29. DOI: 10.25728/avtprom.2020.05.05.
10. **Kovalev, I., Nezhmetdinov, R., and Kvashnin, D.** (2019). Big data analytics of the technological equipment based on Data Lake architecture. In MATEC Web of Conferences (Vol. 298, p. 00079). EDP Sciences. doi:10.1051/mateconf/201929800079.

**Нежметдинов Рамиль Амирович** – д-р техн. наук, доц., профессор кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*r.nezhmetdinov@stankin.ru*

**Ковалев Илья Александрович** – канд. техн. наук, доц. кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*ilkovalev@mail.ru*

**Котырова Ширин** – обучающийся ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*kotyrowashirin@gmail.com*

**Путинцева Елена Валентиновна** – преподаватель кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*derkach.e.v@yandex.ru*

**Nezhmetdinov Ramil' Amirovich** – D.Sc. of Engineering, docent, professor at the sub-department of «Computer control systems» of MSUT «STANKIN»  
*r.nezhmetdinov@stankin.ru*

**Kovalev Ilya Aleksandrovich** – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of «Computer control systems» of MSUT «STANKIN»  
*ilkovalev@mail.ru*

**Kotyrova Shirin** – student of MSUT «STANKIN»  
*kotyrowashirin@gmail.com*

**Putintseva Elena Valentinovna** – lecturer at the sub-department of «Computer control systems» of MSUT «STANKIN»  
*derkach.e.v@yandex.ru*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

## DETERMINATION OF INDICATORS OF THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL LEVEL OF INTEGRATED AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

*Рассмотрены методы определения научно-технического уровня интегрированных автоматизированных систем управления (НТУ ИАСУ), базирующиеся на численных значениях свойств оцениваемой системы и сравнения с показателями, установленными требованиями и вычислении интегральной оценки НТУ ИАСУ.*

*The methods of determining the scientific and technical level of integrated automated control systems (SaTL IACS) based on numerical values of the properties of the system being evaluated and comparison with the indicators established by the requirements and calculation of the integrated assessment of SaTL IACS are considered.*

**Ключевые слова:** интегрированные автоматизированные системы управления, научно-технический уровень, интегральная оценка.

**Keywords:** integrated automated control systems, scientific and technical level, integrated assessment.

Одной из важнейших особенностей применения многоуровневых интегрированных автоматизированных систем является выполнение комплексной автоматизации широкого спектра функций управления деятельностью машиностроительных предприятий, в т. ч. административно-хозяйственных, производственно-технологических и инженерно-технических. Специфика эффективного решения комплекса задач, включающего в себя мероприятия по разработке, постановке на производство и поставке продукции такова, что существует необходимость расчета НТУ этих систем в соответствии с установленными заданиями и планами [1].

Показатели НТУ ИАСУ характеризуют степень соответствия технико-экономических факторов систем тем требованиям, которые предъявляет машиностроительная отрасль в частности и современные достижения науки и техники в целом. При этом для оценки уровня необходимо вычисление численных значений показателей, которые характеризуют научно-технический уровень автоматизированных систем (АС), а также количественные характеристики взаимодействия, используемые при управлении машиностроительным предприятием.

### Определение показателей НТУ ИАСУ

Специфика методов определения показателей НТУ ИАСУ основана на отдельных свойствах оцениваемой системы, которые позволяют в соответствии с нормативной документацией провести вычисление

значений показателей (как единичных, так и обобщенных). Для получения интегральной оценки характерные показатели базовой системы сравниваются с оцениваемыми показателями или установленными требованиями (рис. 1).

Научно-технический уровень ИАСУ может определяться по формуле:

$$Q = Y_{\phi} + \sum_{k=1}^l \lambda_k S_k; \quad k = \overline{(1, l)}; \quad (1)$$

$$1 < Q < 20; \quad 0 < \lambda_k < 10; \quad \sum_{k=1}^l \lambda_k = 10;$$

где  $Y_{\phi}$  — обобщенный показатель, характеризующий научно-технический уровень функционального назначения ИАСУ;  $S_k$  — единичные показатели, характеризующие надежность, технологичность, уровень унификации, стандартизации и эргономического обеспечения ИАСУ;  $l$  — количество единичных показателей, учитываемых при определении НТУ ИАСУ.

Значение  $Y_{\phi}$  определяется составом и научно-техническим уровнем АС, входящих в ИАСУ, и показателями их взаимодействия в процессе выполнения заданных функций [2, 3].

По функциональному назначению в составе ИАСУ выделяются, например, следующие виды АС:

АС организационного управления предприятием — АСУП;

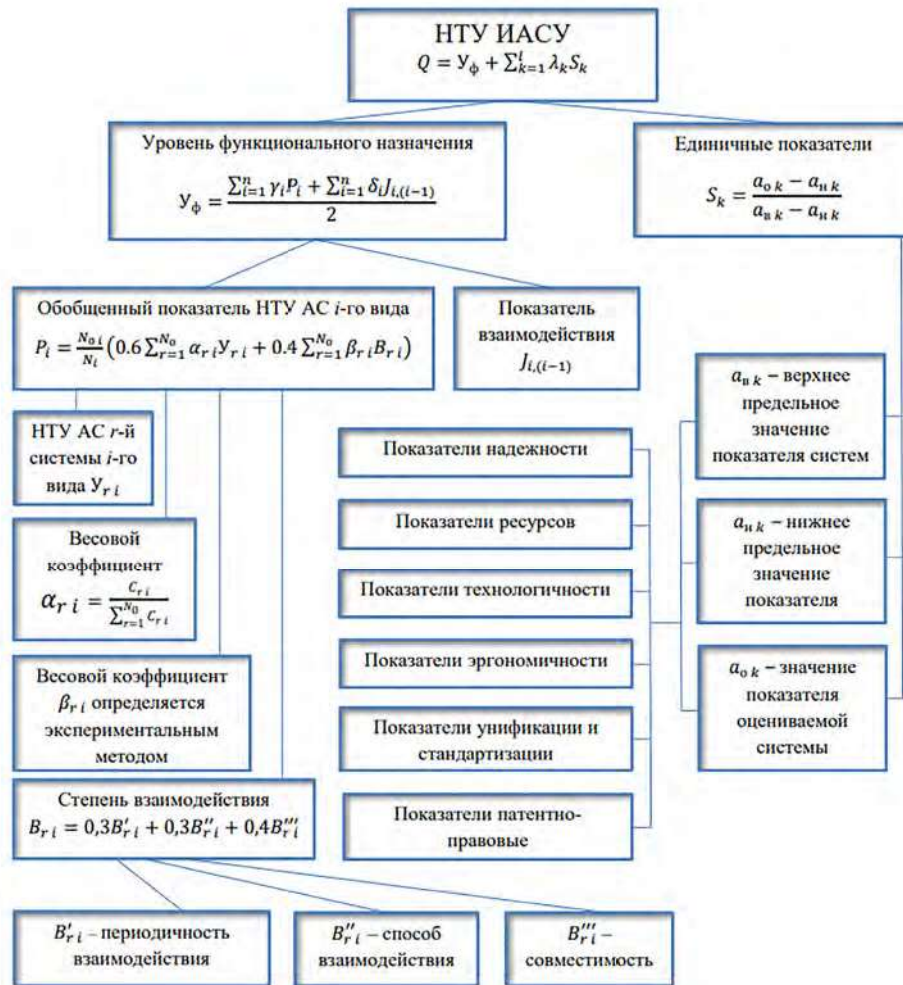


Рис. 1. Структура комплекса показателей НТУ ИАСУ

АС для автоматизации проектно-конструкторских работ — САПР;

АС для управления технологическими процессами — АСУ ТП;

АС научных исследований и испытаний — АСНИ;

АС управления гибкими производственными системами — АСУ ГПС и др.

Обобщенный показатель функционального назначения ИАСУ, включающей  $n$  уровней  $i$ -го вида систем, определяется по формуле

$$y_{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i P_i + \sum_{i=1}^n \delta_i J_{i,(i-1)}}{2}; \quad i = \overline{(1, n)}; \quad 1 < y_{\phi} < 10, \quad (2)$$

где  $P_i$  — обобщенный показатель научно-технического уровня системы  $i$ -го вида;  $\gamma_i$  коэффициент относительной важности  $i$ -вида АС;  $\delta_i$  — коэффициент, характеризующий относительную важность функции взаимодействия  $(i-1)$ -го и  $i$ -го уровней,  $J_{i,(i-1)}$  — вид функции взаимодействия системы  $(i-1)$ -го уровня с системой  $i$ -го уровня (вертикальной интеграции). Вычисление этих характеристик производится с помощью экспертных методов оценки.

Значения показателей  $J_{i,(i-1)}$  приведены в табл. 1.

Обобщенный показатель научно-технического уровня однородных по назначению АС ( $i$ -го вида) определяется по формуле

$$P_i = \frac{N_{0i}}{N_i} \left( 0.6 \sum_{r=1}^{N_0} \alpha_{r,i} Y_{r,i} + 0.4 \sum_{r=1}^{N_0} \beta_{r,i} B_{r,i} \right); \quad (3)$$

$$i = \overline{(1, N_0)}; \quad 1 < P_i < 10,$$

где  $N_0$  — количество АС  $i$ -го вида в составе оцениваемой интегрированной системы;  $N_i$  — количество АС  $i$ -го вида в составе базовой интегрированной системы;  $\alpha_{r,i}$  — весовой коэффициент, характеризующий относительную важность  $r$ -й системы  $i$ -го вида;  $Y_{r,i}$  — научно-технический уровень  $r$ -й АС  $i$ -го вида;  $\beta_{r,i}$  — весовой коэффициент важности взаимодействия  $r$ -й системы  $i$ -го вида с другими АС, который определяется экспертным путем;  $B_{r,i}$  — показатель степени взаимодействия  $r$ -й системы  $i$ -го вида с другими АС.

Коэффициент  $\alpha_{r,i}$  рекомендуется устанавливать в виде доли эффективности или стоимости соответствующей АС либо на основе экспертных оценок относительной важности АС.

Таблица 1. Оценка значений показателей

Функции взаимодействия	Основные процедуры взаимодействия	Оценка
Хранение и актуализация данных	Получение данных от взаимодействующих АС, их обработка, обновление базы данных и хранение данных	2
Разработка норм и нормативов	Статистическая обработка результатов измерений и учета, осуществляемых взаимодействующими АС, контроль отклонений	3
Процедура подготовки и накопления исходных данных для решения задач	Сбор и обработка массивов данных, обмен данными в соответствии с протоколами взаимодействия АС	3
Согласованное оперативно-календарное планирование	Расчеты показателей оперативно-календарного планирования, контроль отклонений, координация функционирования АС	6
Согласованное и перспективное технико-экономическое планирование	Прогнозирование, проведение предплановых расчетов, согласование планов обеспечения ресурсами производства, расчеты показателей развития производства	7
Техническая подготовка производств	Разработка конструкторской и технологической документации Интегрированное управление технологическими процессами Координация производственных и технологических процессов	10

Таблица 2. Значение показателей

Наименование показателя	Характеристика	Оценка в баллах
Периодичность взаимодействия $B'_{r\bar{i}}$	В соответствии с регламентом; данные за месяц, квартал	2
	В соответствии с регламентом; данные за смену, сутки	4
	По запросу	6
	По отклонениям от заданного режима	10
Способ взаимодействия $B''_{r\bar{i}}$	Обмен носителями данных	3
	Локальная вычислительная сеть	10
Совместимость $B'''_{r\bar{i}}$	Обеспечена информационная совместимость	3
	Обеспечена информационная и техническая совместимость	6
	Обеспечена информационная, техническая и программная совместимость	10

Выбранный способ оценки  $\alpha_{r\bar{i}}$  должен наилучшим образом соответствовать особенностям создания и функционирования соответствующего вида АС в составе ИАСУ.

При определении  $\alpha_{r\bar{i}}$  на основе оценки эффективности (стоимости) АС предлагается использовать формулу

$$\alpha_{r\bar{i}} = \frac{C_{r\bar{i}}}{\sum_{r=1}^{N_0} C_{r\bar{i}}}; [0 < \alpha_{r\bar{i}} < 1; \sum_{r=1}^{N_0} \alpha_{r\bar{i}} = 1, \quad (4)$$

где  $C_{r\bar{i}}$  — стоимость (эффективность)  $r$ -й системы.

Коэффициент относительной важности  $i$ -го вида АС может определяться следующим отношением:

$$\gamma = \frac{\sum_{r=1}^{N_0} C_{r\bar{i}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^{N_0} C_{r\bar{i}}}; [0 < \gamma_i < 1; \sum_{r=1}^n \gamma_i = 1. \quad (5)$$

Показатель степени взаимодействия  $r$ -й системы  $i$ -го вида с другими АС  $i$ -го вида (горизонтальная интеграция) определяется по формуле

$$B_{r\bar{i}} = 0,3B'_{r\bar{i}} + 0,3B''_{r\bar{i}} + 0,4B'''_{r\bar{i}} \quad (6)$$

где  $B'_{r\bar{i}}$  — показатель, характеризующий периодичность взаимодействия АС;  $B''_{r\bar{i}}$  — показатель, характеризующий способ взаимодействия АС;  $B'''_{r\bar{i}}$  — показатель, характеризующий совместимость АС.

Значения  $B'_{r\bar{i}}, B''_{r\bar{i}}, B'''_{r\bar{i}}$  определяются с учётом максимальной оценки взаимодействия характеристик  $r$ -й системы  $i$ -го вида с системой  $i$ -го вида (табл. 2).

Процедура расчета единичных показателей НТУ проводится следующим образом.

Устанавливаются нижняя  $\alpha_{nk}$  и верхняя  $\alpha_{sk}$  границы значений  $k$ -го показателя соответственно, после чего определяется значение  $k$ -го показателя

оцениваемой системы  $\alpha_{ok}$ . Так как полученные значения показывают степень приближения к максимально возможным значениям соответствующих показателей (таких как эргономичность, надежность, стандартизация, унификация и технологичность), то необходимо установить одинаковую размерность для проведения соответствующих измерений. Тогда расчет единичных показателей НТУ АСУ производится по формуле

$$S_k = \frac{a_{ok} - a_{nk}}{a_{bk} - a_{nk}}, \quad (7)$$

Исходные данные для расчета НТУ определяют на основе решений, принятых, например, либо на основе данных, нашедших отражение в технической документации ИАСУ, либо на основе сравнения с системами-прототипами, либо в результате проведения различных видов испытаний, анализа функционирования передовых систем, изучения передового отечественного и зарубежного опыта по созданию ИАСУ[4, 5].

Оценку НТУ ИАСУ следует проводить в процессе разработки, внедрения и функционирования системы.

На стадии технического задания значения показателей устанавливаются на основании прогрессивных в научно-техническом отношении требований к создаваемым системам.

#### **Заключение**

Оценка научно-технического уровня на стадии разработки используется для выбора решений, обеспечивающих моральную долговечность разрабатываемой ИАСУ. Оценка НТУ на стадии технического проекта позволяет осуществить выбор методов проектирования и принять решение в части обоснования проектных вариантов, позволяющих обеспечить заданный уровень. Оценка НТУ на стадии рабочего

проекта необходима для реализации выбора методов построения программно-технических комплексов системы. На стадии внедрения определяют степень соответствия достигнутого НТУ проектному НТУ, а на стадии функционирования ИАСУ оценка НТУ позволяет осуществить выбор направлений дальнейшего развития системы.

#### **Библиографический список**

1. **Пикус Д.М., Куришова И.А., Бровкина Н.Б., Черкас Д.В.** Оценка научно-технического развития уровня автоматизированных систем управления, как мера эффективности создаваемых систем // Актуальные проблемы экономики строительства. материалы 8-й Республиканской научно-практической конференции БНТУ, Минск. С. 137–141.
2. **Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф., Схиртладзе А.Г.** Интегрированные системы проектирования и управления. Структура и состав: Учеб. пособие. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006, 172 с.
3. **Третьяков С.М., Угаров А.В., Таранов А.И., Вылков А.С.** Интегрированная логистическая поддержка и управление жизненным циклом в задачах оценки эффективности хранения техники связи и АСУ // Труды VI межвузовской научно-практической конференции, СПб, 2021 г. – С. 114–117.
4. **Лубенцова Е.В., Масютина Г.В., Лубенцов В.Ф.** Обеспечение совместимости АСУ ТП со смежными системами автоматизации и АСУП // Современные проблемы и пути их решения в науке, производстве и образовании. – 2018. – № 6. – С. 32–34.
5. **Одинцов В.П.** Специализированные ИАСУ: логистические информационные системы. // Международный студенческий научный вестник. – 2019. – № 6. – С. 15.

**Мешков Валерий Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
mkt3@mail.ru

**Meshkov Valeriy Gennadyevich** – candidate Sc. of Engineering, docent, associate professor at the sub-department of «Automated information processing and management systems» of MSUT «STANKIN»  
mkt3@mail.ru

## МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ СООСНОСТИ НА КРУГЛОМЕРЕ

## METHODS OF MEASURING COAXIALITY DEVIATIONS ON A FORM MEASURING MACHINE

*Изложена методика измерения отклонения от соосности для цилиндрических деталей на кругломере. Выявлен оптимальный аппроксимирующий элемент для определения центра круглограммы и значения отклонения от соосности. Определена оптимальная длина базового элемента, необходимая для измерения отклонения от соосности. Рассмотрен вопрос выбора необходимого количества сечений при измерении отклонения от соосности.*

*The method of measuring coaxiality deviations for cylindrical details on a form measuring machine is described. The optimal approximating element for determining the center of the circular pattern and the value of the coaxiality deviations is revealed. The optimal length of the base element required to measure coaxiality deviations has been determined. The method of selecting the required number of cross sections when measuring coaxiality deviations is considered.*

**Ключевые слова:** отклонение формы, отклонение от соосности, аппроксимирующая окружность, длина базового элемента.

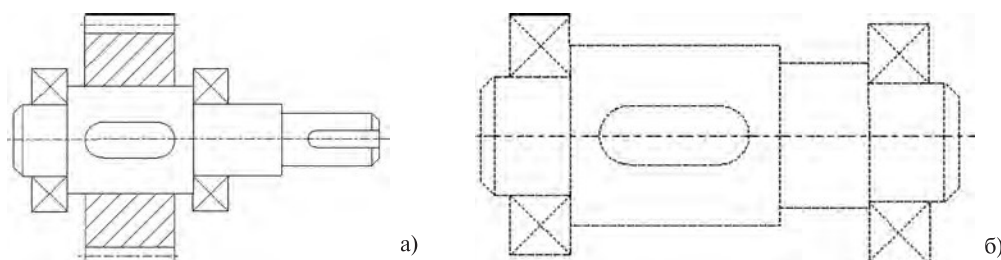
**Keywords:** shape deviation, coaxiality deviation, approximating circle, length of the base element.

В машиностроении важными нормируемыми геометрическими параметрами, характеризующие качество функционирования узлов в механизме, являются отклонения расположения [1]. Отклонение от соосности — это один из видов отклонений расположения, предъявляемый только к цилиндрическим деталям. Предъявление требования к отклонению от соосности необходимо для сопрягаемых вращающихся деталей в механизме, а также деталей, для которых требуется обеспечивать балансировку в виду неравномерности толщины стенок детали.

Задачи измерения отклонения от соосности характерны как для ступенчатых валов, так и для втулок (отверстий). Длины измеряемых поверхностей могут быть различными, в зависимости от конструкции и функционального назначения детали.

При измерении отклонения от соосности ступенчатых валов важную роль играет выбор базового элемента, относительно которого задаются требования к отклонению расположения. Ступенчатые валы, используемые в механизмах, как правило, имеют не-

сколько ступеней, отличающихся между собой диаметральными размерами и протяженностью. Функциональное назначение ступенчатых валов заключается в передаче крутящего момента, поэтому такие детали устанавливаются в механизме так, что две разнесенные между собой ступени одинакового диаметра опираются на подшипники качения. Минимальное количество ступеней у таких валов может быть равно трем. Совокупность осей вращения ступеней, опирающихся на подшипники качения, образует общую ось вращения детали, относительно которой задаются отклонения расположения на чертеже. Такая общая ось вращения ступенчатого вала является конструкторской базой, которую целесообразно использовать в качестве измерительной базы. Для входных и выходных ступенчатых валов механизма одна опорная ступень вала под подшипник качения является крайней ступенью, а вторая — промежуточной (рис. 1, а). Для промежуточных ступенчатых валов механизма обе ступени под подшипники качения являются, как правило, крайними (рис. 1, б).



**Рис. 1.** Ступенчатые валы: а) выходной вал; б) промежуточный вал



Существует большое количество методов измерения отклонения от соосности. На практике часто применяют измерительные установки, построенные на основе средств базирования деталей и индикаторов. Но ввиду развития технического прогресса наиболее приемлемыми на сегодняшний день методами измерения являются методы с использованием автоматизированных измерений и последующей обработкой результатов измерения с помощью заложенного программного обеспечения (ПО). При измерении отклонения от соосности возможно использование универсальных средств измерения — координатно-измерительных машин (КИМ) [2]. Но при использовании КИМ существует ряд проблем, что приводит во многих случаях к существенной методической погрешности [3–6]. Одним из часто встречающихся средств измерения, позволяющим проводить измерения отклонений формы и расположения для цилиндрических деталей и обрабатывать полученную измерительную информацию, являются кругломеры, например, кругломер MarForm MMQ400 [7].

Кругломеры относятся к специальным СИ и встречаются во многих измерительных лабораториях предприятий машиностроительной отрасли. Кругломеры имеют автоматизированную функцию центрирования объектов измерения при настройке прибора, что делает процесс настройки более простым и быстрым. Габаритные размеры прибора позволяют размещать на его измерительном столе детали с размерами по горизонтальной координате  $X$  — до 280 мм, по вертикальной координате  $Z$  — до 500 мм.

Измерение отклонения от соосности на кругломере имеет свои особенности. Предметный стол с измеряемым объектом расположен на торцевой поверхности вращающегося шпинделя прибора, а измерительный наконечник в процессе измерения касается поверхности детали и совершает непрерывное ощупывание измеряемой поверхности. Базирование цилиндрической детали на кругломере осуществляется либо по ее торцевой поверхности, которая устанавливается на измерительный стол прибора, либо в патроне (по цилиндрической поверхности). Таким образом, деталь при измерении расположена всегда вертикально. Нужно отметить, что такой способ базирования цилиндрических деталей приводит к нарушению принципа единства баз, т. к. забазировать де-

таль ни по технологической, ни по конструкторской базе не представляется возможным.

Поперечное сечение реальной цилиндрической детали является сложной плоской фигурой, ограниченной кривой неправильной формы, и не содержит точки, которая была бы равноудалена от всех точек профиля и являлась бы центром сечения. В тоже время профиль сечения близок к окружности, поэтому это дает основание сопоставлять взаимное расположение различных поперечных сечений цилиндрической детали при помощи аппроксимации профиля окружностью и далее рассматривать центр этой окружности как центр измеренного сечения.

Погрешность кругломера при измерении в радиальном направлении не превышает нескольких десятых микрометра. Поэтому наиболее существенной будет методическая погрешность измерения [8]. Для ее определения необходимо провести следующие исследования:

- влияние выбора базовой окружности на определения положения центра сечения;
- влияние выбора базовой оси на значение отклонения от соосности;
- влияние параметров методики измерения (количество и положение измеряемых сечений) на значение отклонения от соосности.

При обработке измерительной информации в качестве аппроксимирующей окружности для измеренного профиля детали могут выступать прилегающая наружная окружность, прилегающая внутренняя окружность, средняя окружность и окружность минимальной зоны.

При выборе методики расчета отклонения расположения в качестве приоритетной аппроксимирующей окружности исходя из нормативных документов целесообразно использовать окружность минимальной зоны, но исследования показали, что с точки зрения точности измерения и контроля оптимально использовать среднюю окружность, т. к. в этом случае характер профиля оказывает меньшее влияние на результат измерения. При использовании прилегающей окружности и окружности минимальной зоны наличие небольших дефектов на измеряемой поверхности детали приводит к смещению центра каждой из этих окружностей, что в значительной мере может повлиять на результат измерения отклонения от соосности (рис. 2).

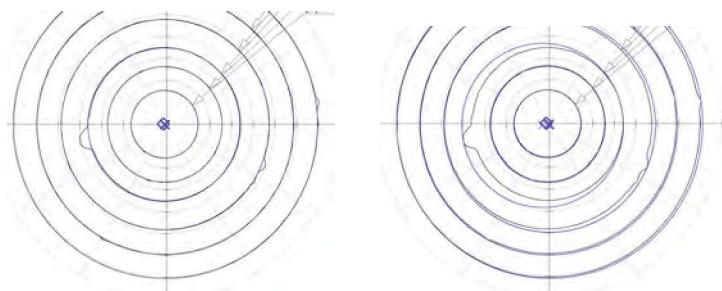


Рис. 2. Средние и прилегающие аппроксимирующие окружности для круглограммв измеренных сечениях ступени вала

На рис. 2. представлены круглограммы пяти измененных сечений ступени вала, для которых построены средняя (рис. 2., а) и прилегающая (рис. 2., б) аппроксимирующие окружности. Крестики на круглограммах соответствуют положениям их центров. На круглограммах видно, что наличие больших отклонений приводит к сильному смещению центра прилегающей окружности. Для средней окружности этого практически не происходит. Отклонение от соосности, посчитанное относительно средней окружности составило 5,08 мкм, а относительно прилегающей окружности — 7,76 мкм. Это означает, что методическая погрешность при использовании прилегающей окружности превышает 50 %. Использование в качестве базы для отсчета окружности минимальной зоны дает результаты аналогичные прилегающей окружности.

При измерении отклонений расположения на кругломере базирование ступенчатых валов всегда осуществляется в вертикальном положении. Для реализации такого базирования вал либо устанавливают торцевой поверхностью на измерительном столе при достаточной площади базируемой поверхности, либо вал устанавливается в трехкулачковом зажиме (патроне), зафиксированном на измерительном столе прибора. Второй способ базирования встречается значительно чаще первого. Поскольку конструкторской базой ступенчатого вала является общая ось вращения, проходящая через ступени вала опирающиеся на подшипники качения, то для согласования измерительной и конструкторской баз установка ступенчатого вала на столе прибора должна осуществляться по ступени, опирающейся на подшипник. Для входных/выходных ступенчатых валов это крайняя ступень вала (рис. 1, а), а промежуточные ступенчатые валы допустимо базировать по любой ступени, являющейся конструкторской базой детали.

Для проведения измерения с помощью кругломера отклонения от соосности оси вращения промежуточной ступени вала, предназначенной для сопряжения с зубчатым колесом, необходимо предварительно выполнить процедуру центрирования измеряемого объекта на предметном столе прибора относительно вращающегося шпинделя и затем выявить расчетным способом положение базового элемента детали для отсчета искомого отклонения, используя ПО средства измерения. Для этого требуется ощупать измерительным наконечником прибора обе ступени вала под подшипники качения в поперечном сечении. Для каждой ступени вала достаточно ощупать поверхность только в одном сечении. По результатам автоматизированного расчета положения центров ошупанных профилей ступеней вала ПО рассчитает положение прямой, проходящей через найденные центры профилей, которая будет являться базой для отсчета отклонения от соосности. Центры ошупанных профилей соответствуют центрам полученных круглограмм. При вертикальном базировании ступенчатого

вала часто наблюдается сложность доступа к нижней цилиндрической поверхности, относящейся к конструкторской базе детали и имеющей небольшую протяженность. Поэтому необходимо проведение исследования зависимости погрешности измерения от положения базового сечения.

Максимальная возможная длина базового элемента ( $l_{max}$ ) ступенчатого вала будет определяться расстоянием между крайними сечениями ступеней вала под подшипники качения. На рис. 3 крайние сечения отмечены римскими цифрами I-I. Минимальная длина базового элемента ( $l_{min}$ ) ступенчатого вала будет соответствовать расстоянию между сечениями, расположенными максимально близко к заплечикам ступеней вала под подшипники. На рис. 3 такие крайние сечения отмечены римскими цифрами II-II. Так как ширина колец подшипников часто невелика, то и длину соответствующих ступеней вала изготавливать очень протяженными нецелесообразно. Поэтому диапазон изменения значений длины базовой оси вращения ступенчатого вала может колебаться в пределах до 60 мм в зависимости от значений диаметров ее ступеней.

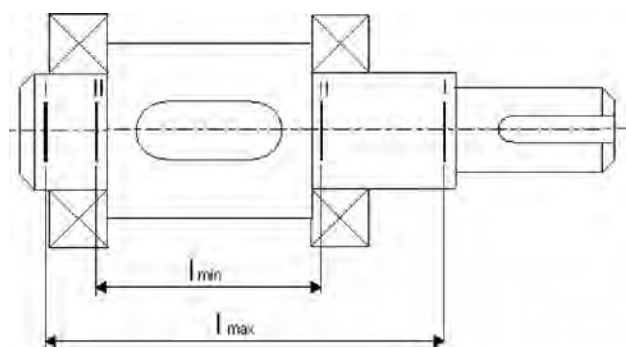


Рис. 3. Длина базового элемента детали для оценки отклонения от соосности

Исследования показали, что изменение длины базового элемента ступенчатого вала (для отсчета отклонения от соосности) в пределах значений, соответствующих ширине двух подшипников качения, не оказывает существенного влияния на результат измерения. Значения отклонения от соосности при значениях длин базовых элементов  $l_{min}=121$  мм и  $l_{max}=155$  мм составили соответственно 2,91 мкм и 2,60 мкм. Методическая погрешность не превышает 10 %. Поэтому при измерении отклонения от соосности осей вращения ступеней ступенчатого вала на кругломере сечения для выявления общей оси вращения вала достаточно выбирать ближе к середине участков ступеней вала, непосредственно сопрягаемых с подшипниками качения. При ограничении доступа к поверхности можно смещать сечение на край поверхности без внесения существенной методической погрешности.

Для непосредственного измерения отклонения от соосности оси вращения ступени вала, предназначенной для ее сопряжения с зубчатым колесом, относительно выявленной (общей) оси вращения вала, необходимо ощупать измерительным наконечником измеряемую поверхность (нормируемый участок) в нескольких сечениях. По конструктивным соображениям проектировать протяженные ступени нецелесообразно, а для процедуры измерения часто достаточно трех сечений: одно в середине ступени и два по краям с отступом на 3–5 мм, что обусловлено технологическими особенностями обработки деталей. С помощью ПО определяется центр измеренного (ощупанного) профиля (в зависимости от выбранной аппроксимирующей окружности) и затем находится расстояние между выявленной общей осью вращения детали и центром измеренного профиля. Полученное значение является значением отклонения от соосности. За результат измерения берется максимальное полученное значение отклонения от соосности, измеренное во всех выбранных сечениях.

На рис. 4 представлены результаты измерения отклонения от соосности в пяти сечениях средней ступени вала при различных значениях длин базовых элементов:  $l=121$  мм и  $l=155$  мм.

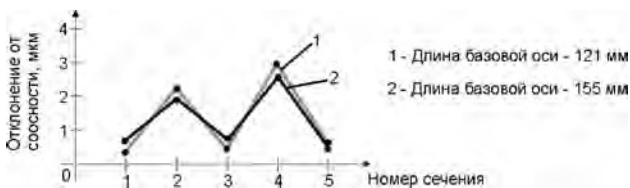


Рис. 4. Отклонение от соосности ступени вала при разных значениях длин базового элемента измеряемого объекта

Максимальные значения отклонения от соосности соответствуют четвертому сечению при измерениях с использованием рассмотренных длин базовых элементов и составили соответственно 2,91 мкм и 2,60 мкм. Следует отметить, что проведенные исследования показали, что измерения в трех сечениях может быть недостаточно. Поскольку, если оценивать результаты измерения по трем сечениям, то отклонение от соосности не превысило бы 0,7 мкм.

В заключение можно сказать, что при измерении детали на дисплее кругломера отображается круглограмма ощупанного профиля ступени вала. Для расчета отклонения от соосности необходимо использовать аппроксимирующие элементы, позволяющие определить центр измеренного профиля. Исследования показали, что в качестве аппроксимирующего элемента оптимально использовать среднюю окружность.

При измерении отклонения от соосности длина базового элемента объекта измерения определяется расстоянием между ступенями вала, опирающимися на подшипники. Оптимальная длина базового эле-

мента должна приходиться на середины участков ступеней, сопрягаемых с кольцами подшипников.

Методика измерения отклонения от соосности подразумевает ощупывание нормируемого элемента ступенчатого вала в трех сечениях. Но исследования показали, что трех сечений может быть недостаточно. Поэтому окончательный выбор необходимого количества сечений для измерения отклонения от соосности остается за оператором, учитывая его квалификацию и опыт работы в измерительной лаборатории.

### Библиографический список

1. Григорьев С.Н., Мастеренко Д.А., Телешевский В.И., Емельянов П.Н. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56–59.
2. Емельянов П.Н., Педь С.Е., Холин И.Е. Разработка эталонной координатно-измерительной машины с ЧПУ // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 68–73.
3. Glubokov A.V., Glubokova S.V., Shulepov A.V., Ped S.E. Spectral parameters of straightness deviation evaluation // Materials Science Forum. 2016. Vol. 876. P. 74–79. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.876.74
4. Педь С.Е. Исследование методической погрешности координатных измерений геометрических параметров деталей машин // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 28–32.
5. Глубоков А.В., Педь С.Е., Глубокова С.В. Влияние числа контрольных точек на погрешность измерения отклонений от прямолинейности // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 24–27.
6. Глубоков А.В., Тверитнев И.О. Влияние выбора базы для отчета отклонений от плоскостности на методическую погрешность измерения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 1. С. 45–50.
7. Егоров С.Б., Егорова Т.П., Капитанов А.В., Митрофанов В.Г., Локтев Д.А. Обеспечение точности измерения погрешностей формы и расположения поверхностей на основе инновационного оборудования // Инновации. 2015. № 8 (202). С. 85–90.
8. Педь С.Е., Дариенко Е.В. Оценка погрешностей координатных измерений параметров сечений цилиндрических поверхностей // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 17–19.

**Глубокова Светлана Владимировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры измерительных информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*glubokovasv@yandex.ru*

**Ковалев Александр Вячеславович** – магистрант ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*av.kovalev@stankin.ru*

**Glubokova Svetlana Vladimirovna** – candidate Sc. of Engineering, associate Professor at the sub-department of «Measuring information systems and technologies» of MSUT «STANKIN»  
*glubokovasv@yandex.ru*

**Kovalev Alexandr Viacheslavovich** – master student of MSUT «STANKIN»  
*av.kovalev@stankin.ru*

---

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОДУЛЬНОЙ МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ С ПРИМЕНЕНИЕМ «ДОМИКА КАЧЕСТВА» НА ПРИМЕРЕ ОПЕРАЦИЙ ГРАВИРОВАНИЯ

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF A MODULAR METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF CONTROL PROGRAMS FOR CNC MACHINES WITH THE USE OF A «HOUSE OF QUALITY» ON THE EXAMPLE OF ENGRAVING OPERATIONS

*В статье предложены пути структуризации и оптимизации типовых технологических переходов механической обработки, выполняемых на станках с ЧПУ. На примере операций гравирования рассмотрена возможность автоматизации вспомогательных процедур за счет внедрения «домика качества», а также формирования фундаментальной базы технологических переходов для увеличения скорости проектирования управляющих программ при качественном выполнении токарно-фрезерной обработки. Представлен алгоритм формирования рабочего кода в автоматизированной среде.*

*The article suggests ways of structuring and optimizing typical technological transitions of machining performed on CNC machines. Using the example of engraving operations, the possibility of automating auxiliary procedures through the introduction of a «quality house», as well as the formation of a fundamental base of technological transitions to increase the speed of designing control programs with high-quality turning and milling processing is considered. An algorithm for generating working code in an automated environment is presented.*

**Ключевые слова:** станки с ЧПУ, резание материалов, управляющая программа, автоматизация подготовки производства, гравирование, металлообработка, производство, конструкторско-технологические элементы, точение, фрезерование.

**Keywords:** CNC machines, cutting of materials, control program, automation of pre-production, engraving, metalworking, production, design and technological elements, turning, milling.

Тенденции к развитию средств автоматизации разработки управляющих программ (УП) имеют традиционно направленный вектор, ориентированный на проектирование технологических операций в специализированных средах. По мере увеличения вычислительных мощностей производители систем автоматизированного проектирования (САПР) и разработки УП предлагают предприятиям постоянно расширяющийся перечень возможностей механической обработки. Как пример можно выделить наличие моделей технологической оснастки (тисков, прижимов, патронов и пр.) для безопасного перемещения инструмента при подходах/отходах в зону резания, наличие моделей режущего инструмента, регулировки их вылета, а также детальной прорисовки рабочих органов станков. Описанные принципы построения УП особенно актуальны на серийных пред-

приятиях, имеющих полноценную штатную цепочку специалистов (технолог — программист — наладчик — оператор станков с ЧПУ). В этом случае создается технологическая документация (ТД) [1], включающая в себя маршрутную карту (МК), карту эскизов (КЭ), подробнейшую карту наладки (КН) и прочие документы согласно единой системы технологической документации. В этом случае каждое последующее согласно МК штатное звено специалистов будет полагаться на данные, полученные из САПР. Однако, при разработке полноценной ТД требуется ввод большого количества информации, что замедляет процесс разработки УП, рис. 1. При этом при некорректном вводе хотя бы одного параметра система обычно выдает ошибку, делая невозможным дальнейшее проектирование. Необходимый массив данных наглядно отображает рис. 1.

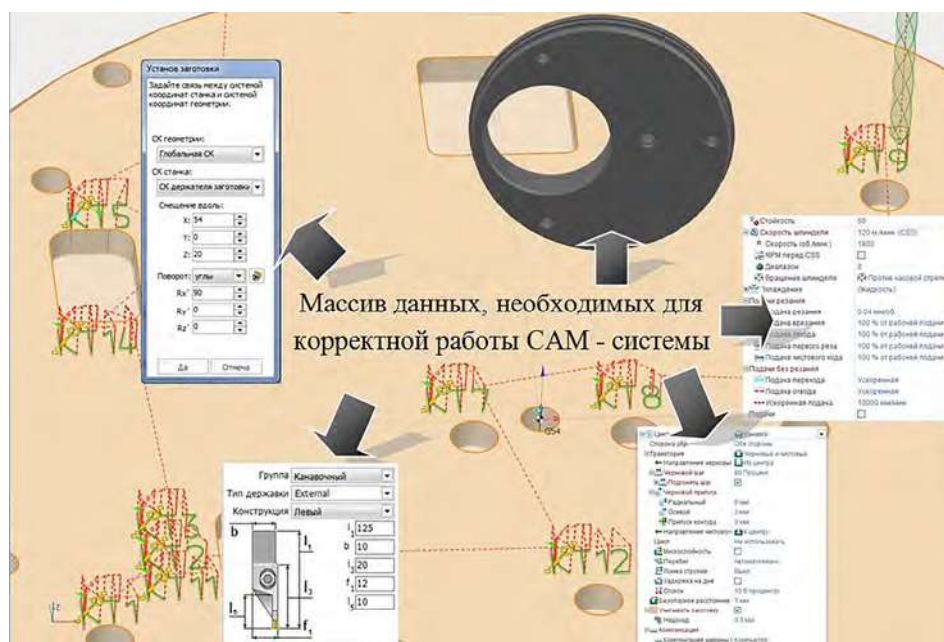


Рис. 1. Базовые параметры, необходимые большинству технологических переходов механической обработки

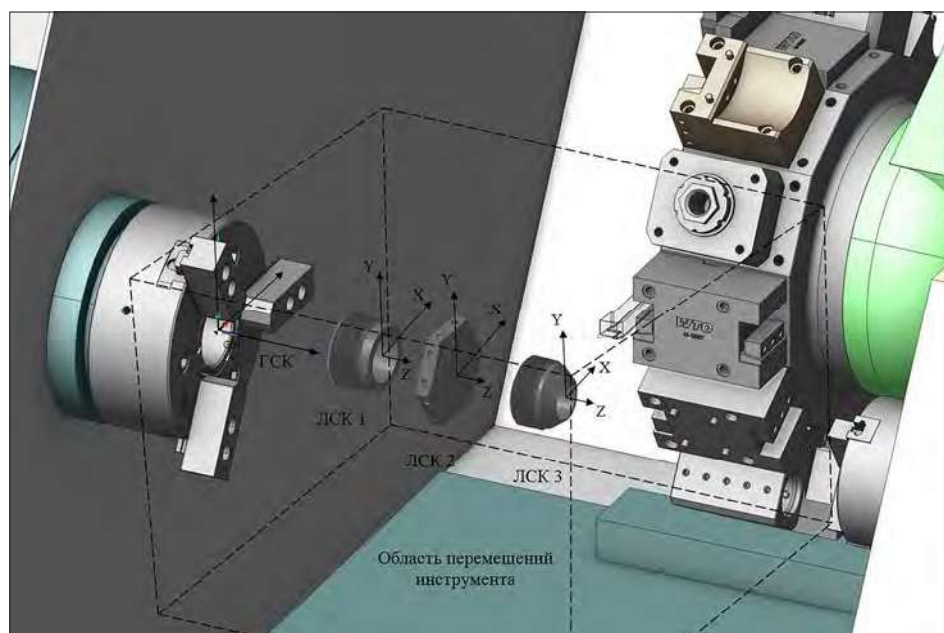


Рис. 2. Зона ограничений перемещения режущего инструмента при ТФО

Токарно-фрезерную обработку (ТФО) в большинстве случаев можно представить как набор типовых технологических переходов [2], а ввиду особенностей кинематических схем используемых станков в целях оптимизации траекторий режущего инструмента имеет смысл создание зоны для ограничения их перемещений, рис. 2.

Таким образом, проецируя вышесказанное на операции гравирования, можно предполагать о возможности уменьшения времени проектирования УП за счет создания алфавитно-цифровой (для различ-

ных шрифтов) шаблонной траектории и через параметрические операции масштабирования охватить весь спектр имеющихся текстовых размеров. Актуальность на данный момент очень высока ввиду сложности проектирования операций гравирования в САМ-системах из-за ввода большого количества данных, прорисовки траекторий, выбора инструмента и других технологических параметров, рис. 3.

Данный принцип построения траектории инструмента применим ко всем системам ЧПУ через функции макропрограммирования. Также предлагаемые

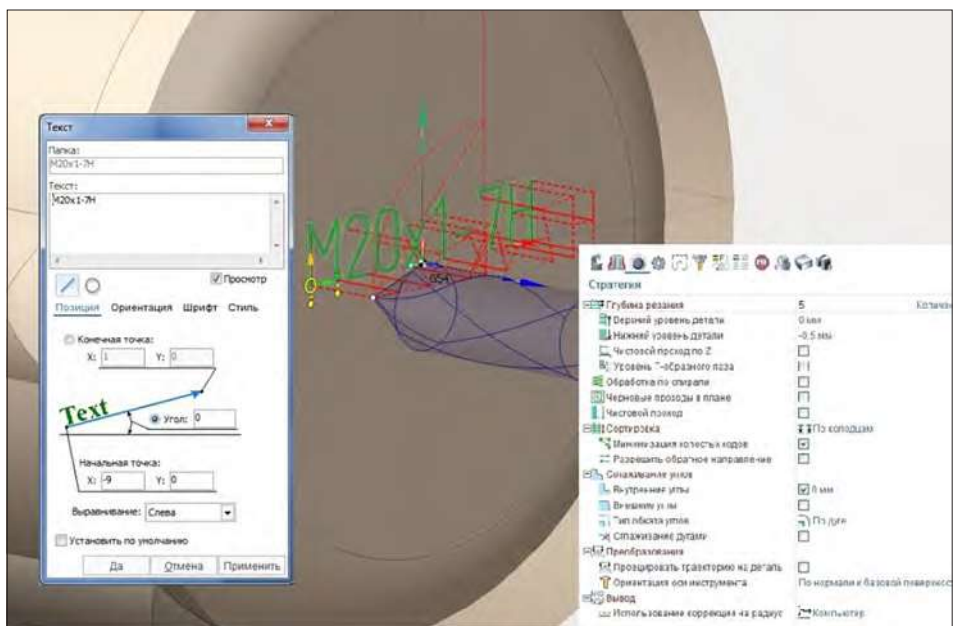


Рис. 3. Ввод параметров при формировании текстовой информации в системе SprutCam

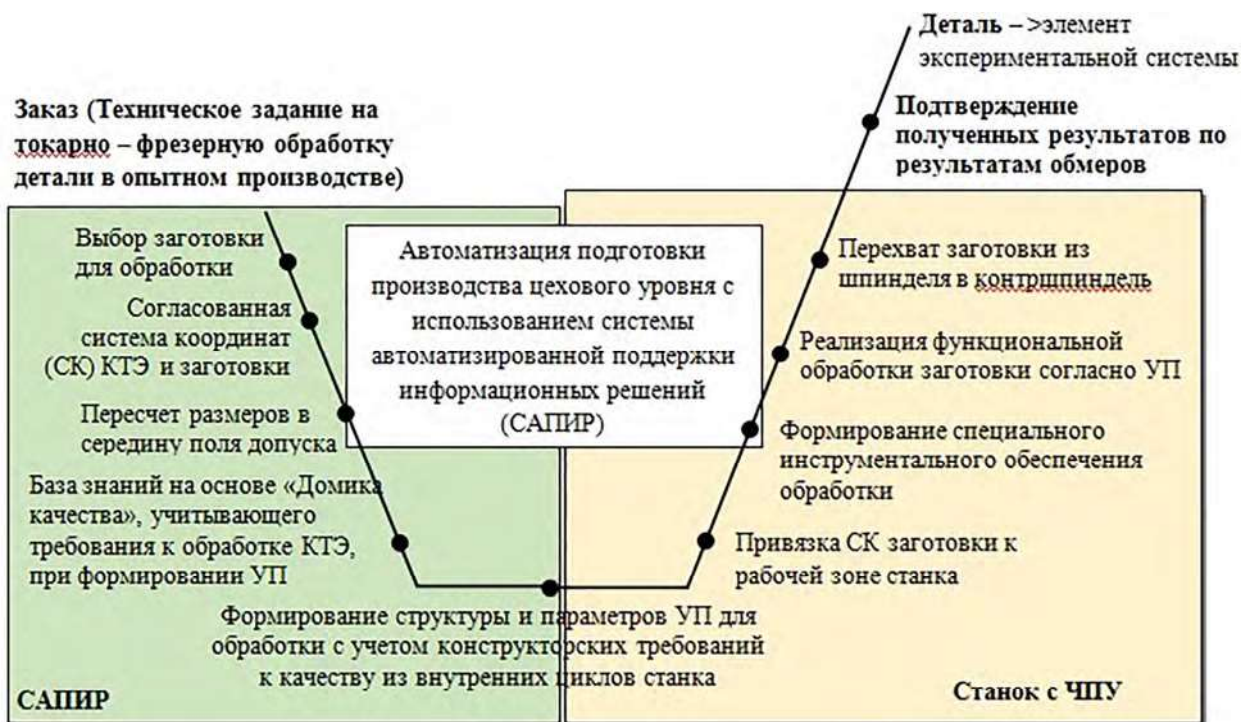


Рис. 4. Распределение задач при подготовке УП для оборудования с ЧПУ в опытном производстве

принципы были реализованы и отработаны совместно с системой автоматизированной поддержки информационно-технологических решений [3] при выполнении работ на токарно-фрезерном обрабатывающем центре Takisawa TS-4000YS на предприятиях опытного производства. Хронология выполнения задач при использовании автоматизированной среды представлена на рис. 4.

Особенности подготовительных мероприятий опытного производства в силу своей ориентированности на быструю переналадку оборудования формируют новые тенденции к системам, сокращающим время проектирования УП для типовых деталей ТФО [4], а использование параметрического программирования позволяет стандартизировать подавляющее большинство операций механической обработки.

**Библиографический список**

1. **Схиртладзе, А.Г.** Технологические процессы в машиностроении [Текст] / А.Г. Схиртладзе, С.Г. Ярушин, С.А. Сергеев. — Старый Оскол: ТНТ, 2008.

2. **Дьяченко, Е.П.** Автоматизация разработки управляющих программ для станков с ЧПУ в различных САПР с использованием информационно-технологической среды [Текст] / Е.П. Дьяченко, А.В. Рыбаков, Е.Н. Дьяченко, С.А. Шептунов // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2017. — № 2 (55). — С. 178–184.

3. **Дьяченко, Е.П.** Статистические показатели использования системы поддержки автоматизированно-

го формирования управляющих программ на примере двухшпиндельных обрабатывающих центров [Текст] / Е.П. Дьяченко, А.В. Рыбаков // Будущее машиностроения России: сб. докл. 12 всерос. конф. молодых ученых и специалистов / МГТУ им. Н.Э. Баумана. — Москва, 2019. — С. 134–137.

4. **Дьяченко, Е.П.** Технологические особенности проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ с учетом кинематических характеристик многошпиндельного оборудования [Текст] / Е.П. Дьяченко, А.В. Рыбаков // Инновационные технологии в машиностроении: сб. труд. X межд. науч.-практ. конф. — Москва, 2019. — С. 136–138.

*Дьяченко Евгений Петрович* — инженер-программист 1 категории АО «Научно-исследовательский инженерный институт» (АО «НИИИ») *e.p.dyachenko@mail.ru*

*Рыбаков Анатолий Викторович* — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории № 1 Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук *avr48@rambler.ru*

*Diyachenko Evgeny Petrovich* — software engineer of the 1st category of JSC «Research Engineering Institute» *e.p.dyachenko@mail.ru*

*Rybakov Anatoly Viktorovich* — candidate Sc. of Engineering, Senior Researcher of laboratory № 1 of the Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences *avr48@rambler.ru*



## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ САД-МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕКРУГЛЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПО ФУНКЦИИ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ

### A UNIVERSAL CAD-ALGORITHM FOR MODELING NON-CIRCULAR GEARS BY THE GEAR RATIO FUNCTION

*Механизмы с некруглыми зубчатыми колесами обеспечивают простой и надежный способ передачи вращения с обеспечением переменной угловой скорости выходного звена. В данной работе приводится алгоритм, позволяющий спроектировать пару некруглых зубчатых колес по необходимой функции передаточного отношения, с использованием пакета прикладных программ T-FLEX CAD.*

*Mechanisms with non-circular gear wheels provide a simple and reliable way of transmitting rotation with a variable angular speed of the output link. In this paper, an algorithm is presented that allows you to design a pair of non-circular gears according to the required gear ratio function using the T-FLEX CAD application package.*

**Ключевые слова:** зубчатые механизмы с некруглыми колесами, автоматизированное проектирование, полярные координаты, моделирование, САД-системы, T-FLEX CAD.

**Keywords:** non-circle gears, automated design, polar coordinates, modeling, CAD-systems, T-FLEX CAD.

В технологических машинах, в ряде случаев, возникает необходимость изменять скорость выходного вала, скорость подачи заготовки или инструмента по заданному закону [1–5]. Некруглые зубчатые колеса (НЗК) дают возможность преобразовывать вращательное движение с постоянной скоростью во вращательное движение с переменной скоростью в рамках одного оборота. Считается, что первые НЗК придумал еще Леонардо да Винчи, однако действительно широкую известность они получили в 20-ом веке. Вопросам автоматизированного проектирования НЗК посвящены работы [1–3]. В них приведены общие сведения по расчету центроид НЗК, а также рассмотрены теоретические аспекты, связанные с теорией зацепления подобных видов зубчатых колес.

НЗК могут быть использованы в технологических машинах с кривошипно-ползунным механизмом (рис. 1). При помощи НЗК можно подобрать такую функцию угловой скорости вращения  $\omega_1$  кривошипа 1, что ползун 3 будет двигаться по любому заданному закону. В качестве ползуна может выступать держатель инструмента или заготовки, таким образом, можно реализовать различные режимы обработки, что наиболее актуально в крупносерийном и массовом производстве, где использование оборудования с ЧПУ экономически нецелесообразно.

НЗК редко применяются в технике из-за сложности их проектирования и производства. Однако в современных условиях инженерам доступны мощные САД-системы и технологическое оборудование с

ЧПУ. Таким образом, проектирование и производство НЗК упростилось и потенциал использования НЗК во многих областях машиностроения существенно возрос. Последние публикации в научных журналах показывают, что интерес к НЗК по-прежнему велик как с точки зрения теории, так и с точки зрения производства и использования в современных высокопроизводительных автоматах [1–3].

Авторами разработан универсальный алгоритм моделирования НЗК в САД-системах. Алгоритм может использоваться при проектировании любых видов НЗК (рис. 2), в том числе эксцентричных, эллиптических, косозубых, спиралевидных и т. д.

Вопросы автоматизированного проектирования НЗК стали особенно актуальны благодаря возможности относительно простого изготовления таких колес на технологическом оборудовании с ЧПУ (электроэрозионное, лазерное, фрезерное, аддитивное оборудование). Модели некруглых зубчатых колес,

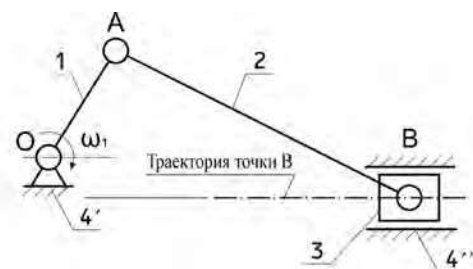


Рис. 1. Кривошипно-ползунный механизм

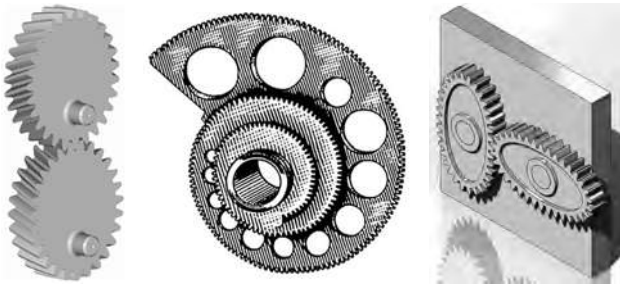


Рис. 2. Некруглые зубчатые колеса

полученные с помощью разработанного алгоритма, могут использоваться при разработке управляющих программ для автоматизированного оборудования с помощью САМ-модуля T-FLEX ЧПУ.

**Расчет центроид**

Рассмотрим схему центроид НЗК (рис. 3) и представим центроид каждого колеса как функцию от угла в полярных координатах.

На рис. 3  $r_\theta$  – функция кривой первой центроиды от угла  $\theta$ ;  $r_\varphi$  – функция кривой второй центроиды от угла  $\varphi$ ;  $u_\varphi, u_\theta$ , – линейная скорость в точке касания.

Межосевое расстояние в зубчатой передаче

$$r_\theta + r_\varphi = A \quad (1)$$

Условие равенства линейных скоростей в точке касания

$$u_\theta = u_\varphi \quad (2)$$

Линейная скорость в произвольной точке на центроиде

$$u = \omega r = \frac{d\varphi}{dt} r \quad (3)$$

Функция переменного передаточного отношения

$$i(\theta) = \frac{d\varphi}{d\theta} \quad (4)$$

При проектировании механизмов с НЗК функция передаточного отношения (4) является одним из самых главных параметров передачи, поэтому формулы для геометрического синтеза НЗК должны выводиться из нее.

Из соотношений (1–4) нетрудно вывести необходимые формулы для построения центроиды:

$$\begin{aligned} r_\theta &= \frac{i(\theta)}{1+i(\theta)} A; \\ r_\varphi &= \frac{1}{1+i(\theta)} A; \\ \varphi(\theta) &= \int i(\theta) d\theta. \end{aligned} \quad (5)$$

Для автоматизации процесса проектирования НЗК целесообразно применять САПР, например, T-FLEX CAD.

**Алгоритм моделирования некруглых зубчатых колес**

1. Согласно техническому заданию определяется необходимая функция передаточного отношения  $i(\theta)$  и межосевое расстояние  $A$ , исходя из которых, рассчитываются центроиды колес.
2. В T-FLEX CAD строится центроид, как функция в полярных координатах.
3. Строится кривая вершин и кривая впадин зубьев, как кривая смещения центроиды.
4. Вдоль кривой центроиды строится массив из  $2Z$  точек с равным шагом, через которые впоследствии будет проходить эвольвента зуба ( $Z$  – количество зубьев колеса). Измеряются параметры радиуса кривизны центроиды для каждой точки массива (радиус  $r_i$  и координаты центра кривизны  $(x_i, y_i)$ , рис. 4).
5. Для каждой  $i$ -ой точки массива создается и заносится в T-FLEX CAD три переменные  $(x_i, y_i, r_i)$ , соответствующие параметрам радиуса кривизны этой точки.
6. Из каждой  $i$ -ой точки массива проводится вспомогательная осевая линия в соответствующую ей точку  $(x_i, y_i)$ .
7. Создается переменная  $\alpha$ . Для каждой осевой линии проводится вспомогательный отрезок под углом  $\pm\alpha$  к осевой линии (знак перед углом зависит от четности  $i$ ), проходящий из точки  $(x_i, y_i)$  и пересекающий центроиду.
8. На каждом  $i$ -ом отрезке, по параметрическим уравнениям (6, 7) строится кривая эвольвенты.

$$\begin{aligned} x &= r_i \cos(20^\circ) (\cos(\#1 \cdot 180^\circ / \pi) + \#1 \cdot \sin(\#1 \cdot 180^\circ / \pi)) \quad (6) \\ y &= \pm r_i \cos(20^\circ) (\sin(\#1 \cdot 180^\circ / \pi) - \#1 \cdot \cos(\#1 \cdot 180^\circ / \pi)) \quad (7) \end{aligned}$$

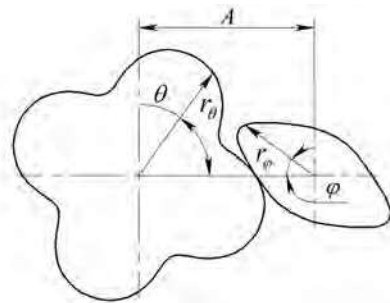


Рис. 3. Схема центроид

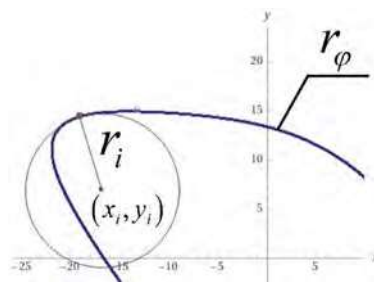


Рис. 4. Определение параметров радиуса кривизны

где #1 — стандартная переменная для построения функции в T-FLEX CAD. Знак перед уравнением (7) зависит от четности  $i$ .

9. Подбирается такое значение угла  $\alpha$ , чтобы кривая эвольвенты пересекала соответствующую ей  $i$ -ю точку массива. Полученное значение  $\alpha$  подставляется в переменную.

10. Инструментом «Изображение» T-FLEX CAD, обводится получившийся профиль колеса.

На рис. 5 и 6 приведены примеры построенных моделей НЗК для разных передаточных функций  $i(\theta)$ .

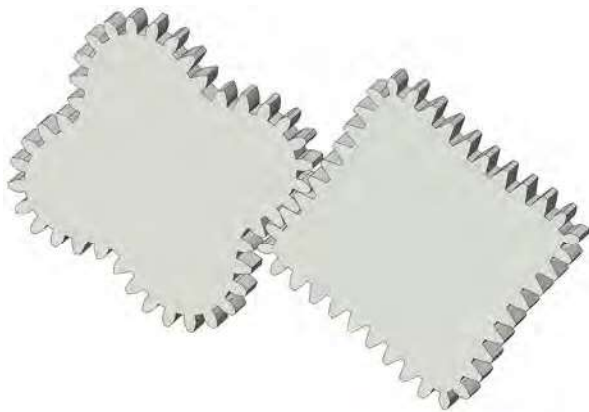


Рис. 5. Модель НЗК при передаточной функции  $i = 1 + \sin(4t) / 3$

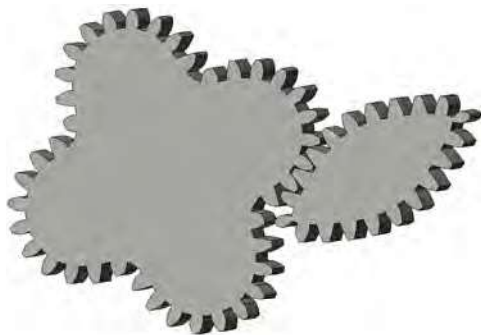


Рис. 6. Модель НЗК при передаточной функции  $i = 2 + \sin(4t)$

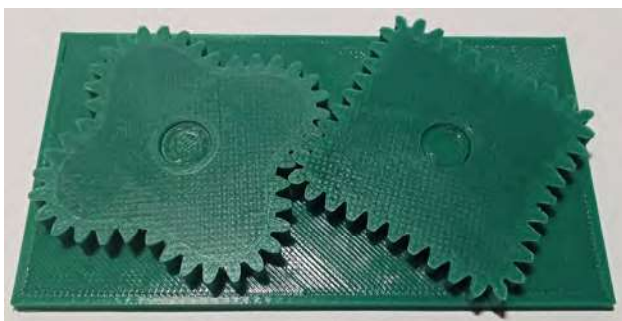


Рис. 7. Модель НЗК, изготовленная на 3D-принтере

С целью верификации результатов моделирования на 3D-принтере в ЦТПО МГТУ «СТАНКИН» были изготовлены несколько макетов механизмов. Один из макетов приведен на рис. 7.

**Заключение**

На основе проведенной работы были получены следующие результаты.

1) Разработана методика автоматизированного проектирования механизмов с НЗК с использованием пакета T-FLEX CAD.

2) Модели, полученные по разработанному авторами алгоритму, могут использоваться для подготовки управляющих программ для технологического оборудования с ЧПУ (электроэрозионные, фрезерные, лазерные станки, 3D-принтеры) с целью изготовления НЗК.

3) В лабораторные работы в рамках курсов «Теория механизмов и машин», «Компьютерная графика», на кафедрах станков и инженерной графики ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» введены элементы получения студентами компетенций в области проектирования специальных зубчатых механизмов с использованием современных САПР. Изготовленные модели также используются во время проведения занятий по основам компьютерного моделирования и прототипирования для школьников.

**Библиографический список**

1. Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes-Aznar, Ignacio Gonzalez-Perez, Kenichi Hayasaka. Noncircular Gears: Design and Generation. Cambridge University Press. — 214 p.
2. Соболев А.Н., Некрасов А.Я., Арбузов М.О. Моделирование механических передач с некруглыми зубчатыми колесами // Вестник МГТУ «Станкин». 2017. № 1. С. 48–51.
3. Гречишников В.А., Колесов К.Н. Использование компьютерных математических систем в инструментальном производстве // Вестник МГТУ Станкин. 2009. № 3. С. 18–22.
4. Isaev A.V., Grechishnikov V.A. Machining curvilinear sections by means of cutting plates with a linear edge. Russian Engineering Research. 2010. Т. 30. № 4. С. 413–417.
5. Grechishnikov V.A., Kosarev V.A., Dymov M.S., Kosarev D.V. Determining the profile of the initial tool surface in planetary machining of internal threads. Russian Engineering Research. 2011. Т. 31. № 6. С. 614–618.
6. Основы двумерного проектирования в T-FLEX CAD. Учеб. пособие./ А.В.Толок, В.А.Гончарова, Е.В.Голова, И.А.Гушин — М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2017.
7. Основы твердотельного моделирования в системе T-FLEX CAD 3D. Учеб. пособие./ В.А.Гончарова, Е.В.Голова, И.А.Гушин — М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2018.

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

**Соболев Александр Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры станков  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*a.sobolev@stankin.ru*

**Белоцкий Алексей Сергеевич** – обучающийся ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*klikest@bk.ru*

**Feofanov Alexander Nikolaevic** – doctor Sc. of Engineering, Professor at the sub-department of «Engineering graphics» of MSUT «STANKIN»  
*feofanov.fan1@yandex.ru*

**Sobolev Alexander Nikolaevich** – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of «Machines» of MSUT «STANKIN»  
*a.sobolev@stankin.ru*

**Belotskiy Alexey Sergeevich** – student of MSUT «STANKIN»  
*klikest@bk.ru*

---

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТОКАРНОМ СТАНКЕ С ЧПУ

## SIMULATION MODEL OF SPHERICAL PROCESSING ON A CNC LATHE

*Приведены результаты исследования имитационной модели сферической обработки на токарном станке с ЧПУ. В основе управления использован конечный автомат, определяющий последовательность переходов и взаимосвязь алгоритмов круговой и линейной интерполяции, ассоциированных с типовой обработкой и режимами резания.*

*The results of the study of the simulation model of spherical machining on a CNC lathe are presented. The control is based on a finite automaton that determines the sequence of transitions and the relationship of circular and linear interpolation algorithms associated with typical processing and cutting modes.*

**Ключевые слова:** имитационная модель сферической обработки, конечный автомат, круговой и линейный интерполятор, контурная скорость, скорость резания, формообразование, сервопривод.

**Keywords:** simulation model of spherical machining, finite state machine, circular and linear interpolator, contour speed, cutting speed, shaping, servo.

### Введение

В системах ЧПУ нового поколения PCNC (Personal Computer Numerical Control) существенно расширены возможности подготовки управляющих программ. Это обеспечивается как за счет функций базового программного обеспечения, так и конструкций языков высокого уровня. Развитие сред терминального управления, использование стандартных параметризуемых шаблонов [1, 2] облегчило разработку программы обработки детали непосредственно на рабочем месте. Дополнительные возможности связаны с использованием графических симуляторов систем ЧПУ как средства предварительной проверки управляющих программ.

Разработка базового программного обеспечения для систем ЧПУ, особенно для Hi-технологий, является трудоемким процессом. Причем, окончательная проверка осуществляется на реальном объекте, в результате которой выявляются наиболее существенные ошибки и формируются окончательные требования к алгоритмическому обеспечению.

На этапах исследовательских работ, для формального представления реальной системы, постановки задач управления и их взаимосвязанного решения, целесообразно использовать среды имитационного моделирования.

С этой целью, в данной статье рассматривается динамическая модель сферической обработки на токарном станке с ЧПУ, как предварительный этап исследования взаимосвязанных компонентов системы,

ассоциированных с типовой обработкой и режимами резания.

### Структура имитационной модели обработки на станке с ЧПУ

Моделирование динамических процессов металлообработки является по существу процессом постановки задач управления и их решения на основе связи функциональных задач и их алгоритмического и программного обеспечения. Стандартная управляющая программа представляет собой последовательность кадров, содержащих набор подготовительных G и вспомогательных M-функций, определяющих совместно с числовой информацией о перемещениях участок обрабатываемой траектории. В тоже время ряд фирм производителей станков с ЧПУ производят замену существующего стандарта обработки ISO 6983 и переходят на стандарт STEP-NC (Standard for the Exchange of Product model data – Numeric Control). Согласно стандарту модель обработки представляет процесс получения изделия из заготовки путем удаления типичных форм [3–5]. Данный подход предполагает, что все программные компоненты, характеризующие процесс обработки, необходимо собирать в одном программном модуле. Это относится как к формированию траектории движения исполнительных органов станка, так и к логике управления, определяющей последовательность операционных переходов. В частности, при разработке функционального программного обеспечения, целесообразно использовать режим организации совместной

работы кругового и линейных интерполяторов. С учетом данных положений разработана структурная схема модели ЧПУ при сферической обработке детали, которая представлена на рис. 1. При разработке структуры имитационной модели, прежде всего, необходим учет динамических режимов металлообработки. С этой целью в структуре управления выделены основные модули и их взаимодействие в процессе обработки. К ним относятся линейные и круговой интерполяторы, сервоприводы, привод главного движения и собственно модель процесса резания, определяющая силовое взаимодействие между исполнительными механизмами.

Процесс управления представлен конечным автоматом, с помощью которого определяется последовательность операций, осуществляется ввод значений координат и организация циклов обработки. Событийный характер обработки обеспечивается за счет контроля обратных связей и их сравнения с заданными уставками. В зависимости от траектории возможны режимы как раздельного использования линейного и кругового интерполятора, так и их совместной работы. Переключение каналов кругового и линейного интерполяторов к входам приводов подает осуществляется с помощью мультиплексоров (МП X, МП Y).

Для повторяющихся циклов обработки используется счетчик циклов. При многопроходной обработке в каждом новом цикле осуществляется ввод значений координат с помощью задатчика линейных перемещений или задатчика параметров дуги.

Оптимизационные задачи обработки, кроме того, требуют организации взаимосвязанного режима резания с поддержанием постоянства скорости резания и контурной подачи [6]. Для этих целей введен делитель, формирующий гиперболическую зависимость частоты вращения электропривода шпинделя (ЭПШ) от радиуса обработки [7]. Траекторный участок дуги, представляет собой произвольный участок полной окружности. Определение координат данного участка осуществляется за счет выбора начальной и конечной точки дуги, а также знака частоты её развертки. Для определения движения по часовой или против часовой стрелки используется коммутатор направления (КН), с помощью которого изменяют знак частоты развертки. Ввод дополнительных параметров обработки (скоростей подач или подач на оборот шпинделя) в среде моделирования Simulink целесообразно осуществлять с помощью формальных переменных.

Рассмотри более подробно специфику реализации блоков при круговой интерполяции.

**Круговой интерполятор.** Известны различные варианты реализации кругового интерполятора [8], в том числе с использованием метода оценочной функции. Однако формирование траектории в виде единичных приращений накладывает определенные ограничения на использование метода оценочной функции, к которым можно отнести нелинейную зависимость контурной скорости от угла дуги. Метод дифференциальных анализаторов по сравнению с методом оценочной функции позволяет организовать работу с постоянной контурной скоростью и более

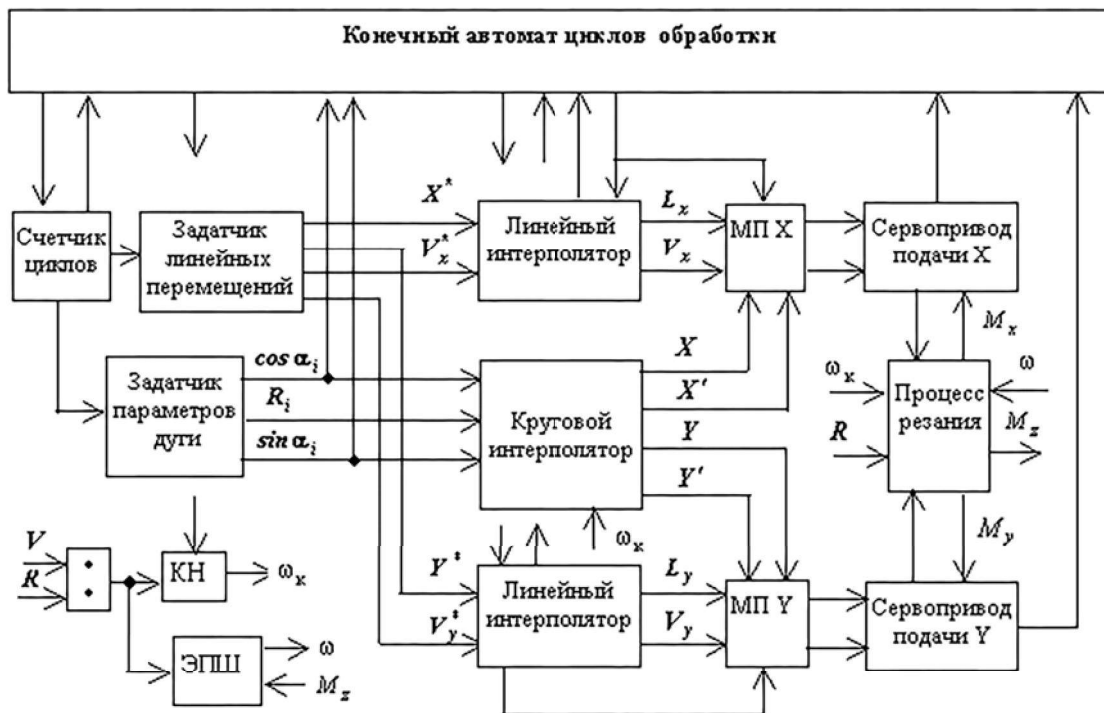


Рис. 1. Структурная схема модели ЧПУ при сферической обработке детали

полно использовать интерполятор для управления следящим электроприводом с комбинированным управлением.

Метод основан на решении дифференциальных уравнений окружности, для плоскости  $(x, y)$  данные уравнения будут

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{d}{dt} R \cos \omega t = -\omega R \sin \omega t ; \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{d}{dt} R \sin \omega t = \omega R \cos \omega t , \end{aligned}$$

где  $\omega$  – угловая частота,  $R$  – радиус окружности.

Структурная схема решения данной системы представлена на рис. 2. Здесь начальные условия  $\sin \alpha_i$  и  $\cos \alpha_i$ , определяют начальную точку дуги. Формирование задающих сигналов перемещений по координатам  $X, Y$  дополнено их производными  $X', Y'$ . Структурная схема может быть упрощена за счет введения начальных условий в виде  $R_i \sin \alpha_i, R_i \cos \alpha_i$ . В этом случае, схема упрощается за счет устранения блоков умножения.

В основе перехода к цифровым методам реализации интерполяторов и цифровых регуляторов заложено использование методов численного интегрирования [9, 10]. Одним из основных условий, предъявляемых к методам численного интегрирования при достаточно малых периодах квантования информации по времени, является устойчивость их решений. Численные методы решения дифференциальных уравнений представляют собой рекуррентные разностные уравнения, которые представлены структурной схемой дискретного интегратора. В частности, для перехода от непрерывных интеграторов кругового интерполятора к дискретным использована подстановка Тастина.

**Процесс резания.** Технология обработки предусматривает выбор инструмента и назначения режимов резания. В большинстве случаев расчёт сил резания

осуществляется на основе эмпирических зависимостей [11]. Полученные экспериментальным путём степенные формулы имеют ограниченное применение, так как характеризуют прогнозируемые, а не текущие величины. Для более полного представления процесса обработки рассмотрим структурную схему процесса резания (рис. 3), выделив из многофакторного процесса механизм стружкообразования и силовые параметры резания [7].

В процессе обработки формообразование поверхности детали может быть записано следующим образом:

$$\Phi(\tau) = V_k \tau a_z = \omega_k R_i \tau a_z$$

где  $\tau = 2\pi / \omega$  – время одного оборота шпинделя;  $a_z = a_z^* + \Delta a_z$  – глубина резания;  $\Delta a_z$  – неравномерность припуска обработки детали.

Текущие значение сил резания с учетом разложения контурной скорости на составляющие по координатам  $x, y$  равны

$$F_x(\tau) = \Phi(\tau) H_w(\tau) C_{F_x}(\tau) \sin \alpha ;$$

$$F_y(\tau) = \Phi(\tau) H_w(\tau) C_{F_y}(\tau) \cos \alpha ;$$

$$F_z(\tau) = \Phi(\tau) H_w(\tau) C_{F_z}(\tau) ,$$

где  $H_w$  – твердость материала заготовки;  $C_{F_x}, C_{F_y}$  – коэффициенты, характеризующие геометрические параметры режущего инструмента и неучтенные условия обработки на плоскости  $x, y$ ;  $C_{F_z}$  – коэффициент, характеризующий параметры инструмента и условия обработки по тангенциальной составляющей усилия резания.

Момент на валу привода главного движения  $M_z = F_z R_{обп}$ , а статические моменты на валу двигателей подат определяются через коэффициенты приведения  $M_{x,y} = F_{x,y} \rho_{x,y}$ , где  $\rho_{x,y} = V_{x,y} / \omega_{x,y}$  – радиусы

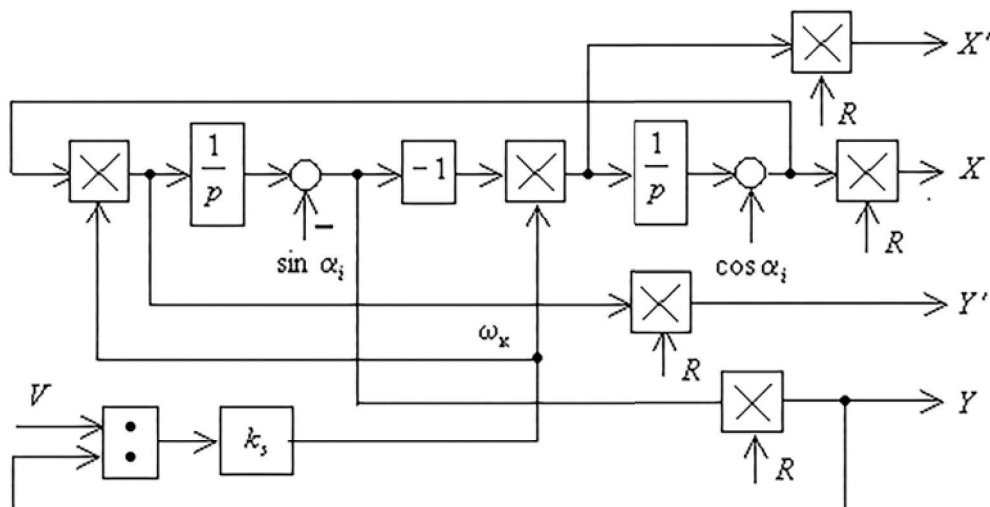


Рис. 2. Структурная схема кругового интерполятора

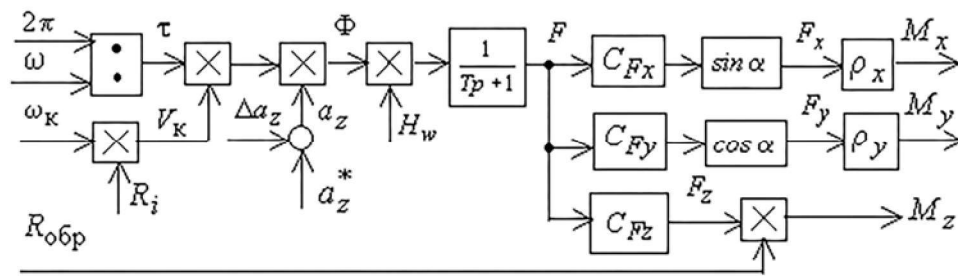


Рис. 3. Структурная схема процесса резания

приведения по соответствующей координате. Процесс врезания в первом приближении может быть представлен в виде апериодического звена.

**Пример обработки.** Рассмотрим цикл работы на основе примера обработки типовой формы. На рис. 4 представлена траектория движения инструмента при формировании сферы на торце цилиндра.

Приняв за основу схему обработки (рис. 4), в каждом проходе можно определить начальные координаты вершины резца  $y_i = R_i \sin \alpha_i$ ,  $x_i = R_i \cos \alpha_i$  и угол  $\alpha_i = \arctg(y_i / x_i)$ .

Данный угол определяет начальные условия обработки  $\sin \alpha_i$ ,  $\cos \alpha_i$  дуги окружности и ее радиус

$R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ . Учитывая, что  $x_i = \text{const}$  радиус обработки будет зависеть от начального положения координаты  $y_i$ , определяющей припуск на сьем металла. Контурная скорость равна  $V_k = \omega_k R_i$ , а направление развертки движения определяется знаком круговой частоты  $\omega_k$ .

Оптимизация обработки на станках с ЧПУ осуществляется за счет скоростных режимов резания. К их числу относятся режим: поддержания постоянства скорости резания и подачи на оборот шпинделя [11]. При обработке криволинейных поверхностей контурная скорость определяет результирующую подачу на оборот шпинделя. Для обеспечения заданной шероховатости поверхности изделия необходимо поддерживать постоянное соотношение между контурной скоростью и скоростью резания.

Скорость съема стружки (скорость резания) вращающейся заготовки 1 определяется относительно положения режущей кромки резца 2. Траектория движения при обработке дуги соответствует винтовой линии с переменным радиусом обработки  $R_{\text{обp}}$ . При этом изменение  $R_{\text{обp}}$  зависит от приращения угла поворота  $\alpha$ , которое, в свою очередь, определяет подачу на оборот шпинделя. Нелинейная зависимость подачи на оборот шпинделя определяется соотношением между скоростью контурной подачи  $V_k$  и скоростью резания  $V$

$$k_s = \frac{V_k}{V} = \frac{\omega_k R_i}{\omega R_{\text{обp}}} = \frac{\omega_k R_i}{\omega R_i \sin \alpha},$$

где  $\omega$  — частота вращения заготовки;  $\omega_k$  — угло-

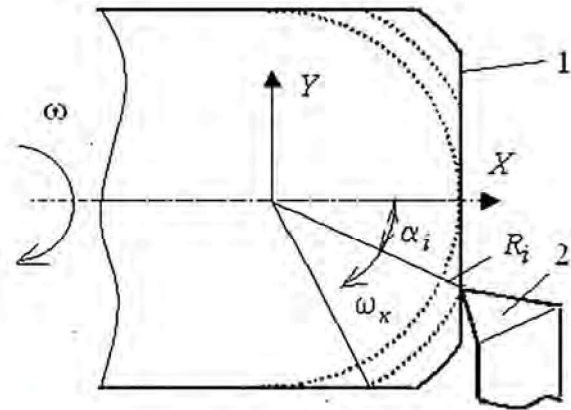


Рис. 4. Эскиз обработки детали

вая частота развертки движения по дуге;  $k_s = \text{const}$  — коэффициент, характеризующий подачу на оборот шпинделя;  $\alpha$  — текущий угол дуги относительно оси вращения заготовки.

Если принять значение  $k_s = \text{const}$ , то для обеспечения постоянства скорости резания частоту вращения шпинделя необходимо регулировать в соответствии с зависимостью  $\omega = V / R_i \sin \alpha$ .

Постоянство подачи при этом обеспечивается регулированием угловой частоты развертки дуги в функции частоты вращения шпинделя  $\omega_k = k_s \omega$ .

**Алгоритм.** Основу микропрограммного управления представляет конечный автомат цикла обработки. Рассмотрим цикл обработки детали (см. рис. 4). После подрезки торца цилиндра и выхода в точку, соответствующую началу цикла  $X_H = R$ ,  $Y_H = 0$ , последовательность операций формирования сферы можно представить следующим образом:

1. Переход в точку  $X_i = R_i \cos \alpha_i$ ,  $Y_i = R_i \sin \alpha_i$ . Для этого на входы кругового и линейных интерполяторов предварительно вводят начальные условия, производят запуск линейных интерполяторов и подключение их выходов к входам сервоприводов.
2. Пауза на завершение переходного процесса. С учетом колебательности переходных процессов приводов подач — это гарантирует их выход в установившуюся позицию.
3. Запуск кругового интерполятора. Это осуществляется путем переключения входов следящих приводов к выходам кругового интерполятора,



выбором знака  $\omega_k$ , определяющего движение по часовой стрелке, и подключения датчика частоты к интерполятору.

4. Проверка события (дуга отработана  $Y_i \geq R_i \cos \alpha_i$ ). Если дуга отработана, то знак контурной частоты  $\omega_k$  изменяют на противоположный. В результате осуществляется возврат в начальную точку дуги.

5. Проверка события (возврат в исходную начальную точку дуги  $X_i \leq R_i \sin \alpha_i$ ). Если вернулись в исходную точку, то отключить работу кругового интерполятора  $\omega_k = 0$ , увеличить счетчик циклов на 1.

6. Проверка события (конец циклов  $i = n$ ). Если обработка закончена, то выход из функции, иначе загрузить следующие значения  $\sin \alpha_{i+1}$ ,  $\cos \alpha_{i+1}$  и  $R_{i+1}$ , переключение входов следящих приводов на работу от линейных интерполяторов, переход на пункт 2.

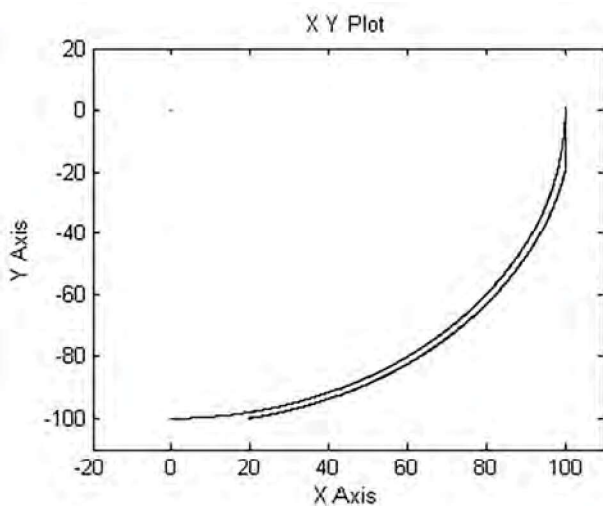


Рис. 5. Траектория движения вершины резца

**Результаты моделирования.** Разработка имитационной модели процесса обработки проводилась в программной среде Matlab-Simulink [12]. Исследование проводилось с учетом реальных свойств и ограничений регуляторов электропривода главного движения и приводов подач. Наиболее критичные режимы работы приводов наблюдаются при обработке сферы вблизи оси вращения детали. На рис. 5 показаны два прохода, один из которых черновой, а другой чистовой. Траектория движения вершины резца, на каждом из проходов содержит прямую ветвь (по часовой стрелке) и обратную ветвь (против часовой стрелки). При этом они практически совпадают. С одной стороны это можно оценить как точность работы интерполятора на заданном промежутке времени, а с другой стороны как меру, способствующую устранению накопленной ошибки.

При работе интерполятора в режимах стабилизации скорости резания и постоянства контурной

подачи происходит изменение формы тригонометрических зависимостей (рис. 6). При этом  $\cos$  составляющая вырождается практически в прямую линию. Характерным режимом при этом является постоянство подачи по координате  $X$ . При прямом и обратном проходе знаки контурной скорости противоположны. Переключение на линейный участок обработки сопровождается паузой работы кругового интерполятора, за время которой производится выход на расчетные точки начала движения по дуге. Это осуществляется за счет приводов подач. Переходные процессы сервопривода по координате  $Y$  представлены на рис. 7. Черновой проход характеризуется более интенсивными процессами, что связано с выходом на расчетные точки в начале и конце участка обработки дуги. Чистовой проход имеет более сглаженный переход в момент реверса привода подачи.

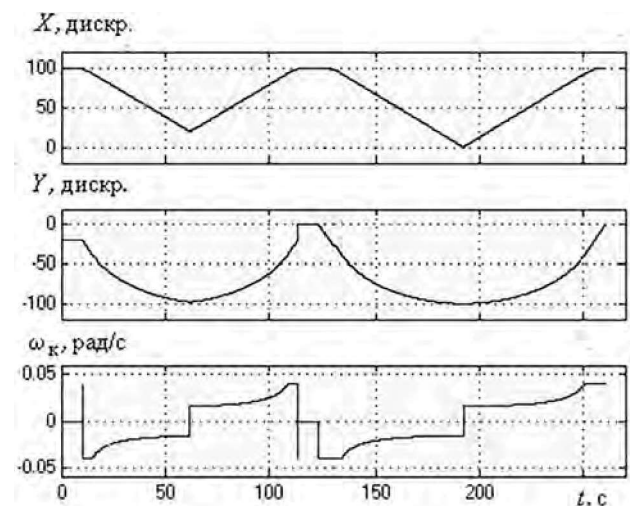


Рис. 6. Диаграммы работы кругового интерполятора

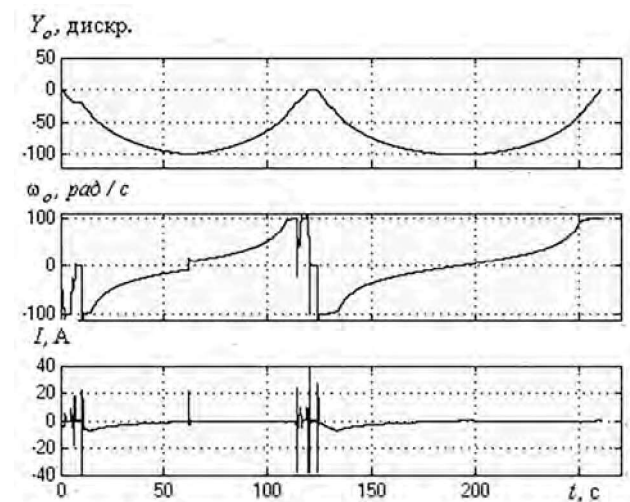


Рис. 7. Переходные процессы сервопривода подачи

**Заключение**

В зависимости от поставленных задач рассмотренная модель обработки может уточняться за счет более полного учета кинематики станка, упругих свойств режущего инструмента и обрабатываемой детали. Наличие мощной базы моделей среды Simulink позволяет последовательно уточнять реальные свойства системы регулирования и формировать алгоритмические требования к программному обеспечению систем ЧПУ. Рассмотренные принципы построения имитационной модели обработки вписываются в концепции событийно-ориентированного программирования, в основе которого заложено выделение главного цикла приложения, реализующего выборку события и его обработку.

**Библиографический список**

1. **Павлов С.А.** T-FLEX CAD/CAM: параметрические технологии для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ // CAD/CAM/CAE Observer. 2013. № 6.
2. **Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю.** Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. М.: Эльф ИПР, 2006, 286 с.
3. **Мартинов Г.М., Сосонкин В.Л.** Формализация данных STEP-NC-формата: фаза построения UML-модели // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 1. С. 49–56.
4. **Мартинов Г.М.** Современные тенденции развития компьютерных систем управления технологического оборудования // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 1. С. 74–79.
5. **Yusri Yusof, Nurul Zakiah Zamri Tan, Noordiana Kasim.** Exploring the ISO 14649 (STEP-NC) for Intelligent Manufacturing System // European Journal of Scientific Research, 2009. Vol. 36. No. 3.
6. **Ridwan F., Xu X., and Ho F. C. L.** Adaptive execution of an NC program with feed rate optimization, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012. Vol. 63, No. 9–12, pp. 1117–1130.
7. **Иванов В.М.** Имитационная модель системы стабилизации скорости резания для металлорежущих станков с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление, Том 21, № 2 2020. С. 110–116.
8. **Байков В.Д., Вашкевич С.Н.** Решение траекторных задач в микропроцессорных системах ЧПУ / Под ред. В.Б. Смолова. — Л.: Машиностроение, Ленингр. Отделение, 1986. — 106 с.
9. **Смит, Джон М.** Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей / Пер. с англ. Н.П. Ильиной; Под ред. О.А. Чембровского. М.: Машиностроение, 1980. — 271 с.
10. **Егоров В.Н., Корженевский-Яковлев О.В.** Цифровое моделирование систем электропривода. Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 168 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещярякова. — М.: Машиностроение-1, 2003. — 944 с.
12. **Дьяконов В.** MATLAB 6: учебный курс — СПб.: Питер, 2001. — 592 с.

**Иванов Владимир Михайлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ)  
v.ivanov@ulstu.ru

**Ivanov Vladimir Mikhailovich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of «Electric Drive and Automation of Industrial Installations» of Ulyanovsk State Technical University (UIGTU)  
v.ivanov@ulstu.ru

## МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ УНИФИКАЦИИ ФОРМАТОВ КАДРОВ

## METHODOLOGY FOR ENSURING THE INTEROPERABILITY OF WIRELESS SENSOR NETWORKS BASED ON THE UNIFICATION OF FRAME FORMATS

*Проведен анализ стандартов беспроводных сенсорных сетей (семейство IEEE). Рассмотрены стек протоколов и структура кадров данных. Предложены две методики для унификации фреймов данных изучаемых стандартов на канальном уровне. Оценена эффективность предложенных методик с точки зрения соотношения размера заголовков к общему размеру кадра.*

*The analysis of standards of wireless sensor networks (IEEE family) is provided. The protocol stack and data frame structure are considered. Two methods are proposed for the unification of data frames of the studied standards at the data link level. The effectiveness of the proposed methods is evaluated in terms of the ratio of the size of headers to the size of the overall frame.*

**Ключевые слова:** беспроводные сенсорные сети, стандарты, унификация, интероперабельность, формат кадров.

**Keywords:** wireless sensor networks, standards, unification, interoperability, frame format.

### Введение

Беспроводные сенсорные сети (далее — БСС) являются основным компонентом индустрии 4.0 и систем автоматизации, где играют важную роль в процесс сбора и обработки данных о состоянии оборудования, существующих в производстве. БСС работают по разным протоколам передачи данных. В данный момент существуют научные разработки в области совместимости разных протоколов беспроводных сенсорных сетей. Из-за ограничений, разницы в кадрах данных и различных требований этих протоколов, до сих пор отсутствует единый стандарт протокола связи, который обеспечивал бы возможность подключения различных устройств БСС в одну интегрированную систему. В связи с этим представляется целесообразным разработать интерфейс, который обеспечивал бы связь между двумя или более различными протоколами БСС, другими словами, объединил кадры данных различных протоколов. Поскольку стандарты БСС на канальном уровне несовместимы, рассмотрена возможность обеспечения совместимости (унификации данных) на канальном уровне. Для решения этого вопроса, проведем анализ стандартов БСС, на основе анализа предложены 2 методики унификации структур кадров данных изучаемых стандартов на канальном уровне. Оценена эффективность предложенных методик с точки зрения соотношения размера заголовков к общему размеру кадра.

### 1. Анализ спецификации протокола ZigBee

Протокол ZigBee был первоначально разработан ZigBee Alliance для приложений домашней автоматизации. В 2007 году была выпущена спецификация ZigBee Pro в целях соответствия новым промышленным требованиям. Она определяет облегченный стек протоколов со сниженным энергопотреблением, поддержку различных сетевых топологий, таких как звезда, дерево или решетка, и возможность крупных развертываний с сотнями устройств. Архитектура основана на трех различных устройствах: координатор ZigBee, маршрутизатор ZigBee, а также конечные устройства ZigBee [2]. Нижние уровни протокола (физический и канальный уровень) разработаны IEEE и определяются стандартом IEEE 802.15.4. В соответствии с моделью OSI, каждый нижележащий уровень добавляет к передаваемым данным свой заголовок [4]. Кадр данных физического уровня включает множество полей: преамбула (32 бита) для синхронизации, начальный ограничитель кадра (8 бит), который должен быть равен “11100101”, физический заголовок (8 бит) и поле данных (PSDU: блок данных сегмента полезной нагрузки), которое имеет переменную длину (от 0 до 1016 бит) [1]. На канальном уровне структура фрейма MAC разработана таким образом, чтобы свести сложность к минимуму, обеспечивая при этом их достаточную надежность для передачи по зашумленному каналу. Кадр MAC состоит из трех полей:

Заголовок MAC (MHR), содержащий поле управления кадром (2 байта), порядковый номер и поле адреса; блок данных службы MAC (MSDU), который является переменной с ограничением в 127 байт для полного кадра MAC) и MAC (MFR) с длиной 16 бит. Верхние уровни стека (сетевой и прикладной уровни) протоколов определяются Альянсом ZigBee, кадр каждого уровня состоит из заголовков и полезной нагрузки.

## 2. Анализ спецификации протокола Wi-Fi

Wi-Fi разработан консорциумом Wi-Fi на базе серии стандартов IEEE 802.11 (1997 г.) и обеспечивает скорость передачи от 1–2 до 54 Мбит/с. В промышленной автоматизации из множества стандартов серии 802.11 используются только два: 802.11b со скоростью передачи до 11 Мбит/с и 802.11g (до 54 Мбит/с) [7]. Естественно, что стек протоколов стандарта IEEE 802.11 соответствует общей структуре стандартов комитета 802, т. е. состоит из физического уровня и уровня MAC (управление доступом к среде), над которыми работает уровень LLC (управление логическим каналом) [5]. Физический уровень состоит из двух подуровней: 1. PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) — выполняет процедуру отображения PDU уровня MAC (элемента протокола данных) во фрейм формата FHSS или DSSS. Эта процедура выполняет передачу, обнаружение несущей и прием сигнала; 2. PMD (Physical Medium Dependent) — подуровень, зависящий от среды передачи. Этот уровень будет различным для разных скоростей передачи и разных стандартов из серии 802.11. Подуровень PMD обеспечивает данные и сервис для подуровня PLCP и функции радиопередачи и приема, результатом которых является поток данных, информация о времени, параметры приема [7]. В эталонной модели IEEE 802.11 подуровень MAC расположен над физическим уровнем. Он решает следующие задачи: выделение каналов путем предоставления доступа на основе метода CSMA, адресация блоков данных PDU (Protocol Data Unit), форматирование кадров, обнаружение ошибок, а также фрагментация и сборка блоков данных [6]. Существуют три типа кадров MAC: Кадры управления; Кадры контроля и кадры данных. Передача данных на MAC-подуровне организована в виде MAC-кадров и содержит следующие поля: поле управления кадром; поле идентификации длительности ID; адресные поля; поле управления очередностью кадров; тело кадра (поле данных) и контрольная сумма (CRC-поле) [6].

## 3. Анализ спецификации протокола WirelessHART

WirelessHART — это протокол связи беспроводной ячеистой сети, основан на стандарте IEEE 802.15.4 и является расширением проводного протокола HART, работая на частоте 2,4 ГГц. Он был разработан в 2007 году для автоматизации процессов мониторинга и управления коммуникационной сетью [2]. Протокол связи WirelessHART использует только пять уровней

модели OSI из семи. Протокол частично реализует физический уровень IEEE 802.15.4 и расширяет свой MAC-уровень с добавлением новых функций. Кроме того, он реализует свои собственные каналы передачи данных, сетевые и транспортные уровни. Наконец, он использует тот же прикладной уровень, что и проводной протокол HART (с добавлением беспроводных команд). Преимущества протокола WirelessHART: разные топологии, например звезда или решетка, а также надежная, безопасная и прочная связь даже в суровых промышленных условиях. Уровень канала передачи данных отвечает за подготовку пакетов для их передачи. Структура кадра данных канального протокола передачи данных DLPDU WirelessHART, состоит из: заголовков (адреса источника и назначения; порядковый номер, тип DLPDU и код целостности сообщения); полезной нагрузки DLPDU и конечного ограничителя. Общая структура кадра данных сетевого протокола NPDU WirelessHART, состоит из: заголовков (источник и конечный адрес назначения; время создания пакета, максимальное количество разрешенных переходов пакета перед его отбрасыванием и идентификатор графика ID); подуровня безопасности и полезной нагрузки [8].

## 4. Унификация фрейма данных стандартов БСС

Для улучшения совместной работы и совместимости стандартов были внесены значительные улучшения на сетевом уровне, уровне MAC и физическом. Тем не менее, все еще существует гораздо больший разрыв, который необходимо сократить, чтобы все промышленные БСС соответствовали друг другу [3]. При анализе структуры кадров изучаемых стандартов, видно, что, каждый кадр на каком-то уровне стандартов содержит заголовки, служебные поля (поле управления, порядковый номер, адреса источника и назначения, контрольная сумма и др.), полезные поля (payload) и др. Замечено, что некоторые поля и заголовки общие, исходя из этого существует возможность для обеспечения совместимости таких стандартов путем объединения форматов данных разных стандартов в общий универсальный кадр. Следовательно, для решения вопроса совместимости стандартов БСС предложим две методики унификации кадра данных. Суть предложения состоит в разработке либо универсального кадра данных (для любого количества протоколов, рис. 1.а), либо посредника (подходит только для двух протоколов, рис. 1.б). На рис. 1. показаны предложенные методики унификации кадров данных. На основе этих методик, в нашем универсальном кадре будут размещены общие заголовки и поля, и тоже уникальные поля, и данные тех стандартов.

В табл. 1. изложены форматы кадров изучаемых стандартов (ZigBee, Wi-Fi, WirelessHART) на канальном уровне.

При анализе форматов кадров канального уровня изучаемых протоколов, очевидно что каждый кадр

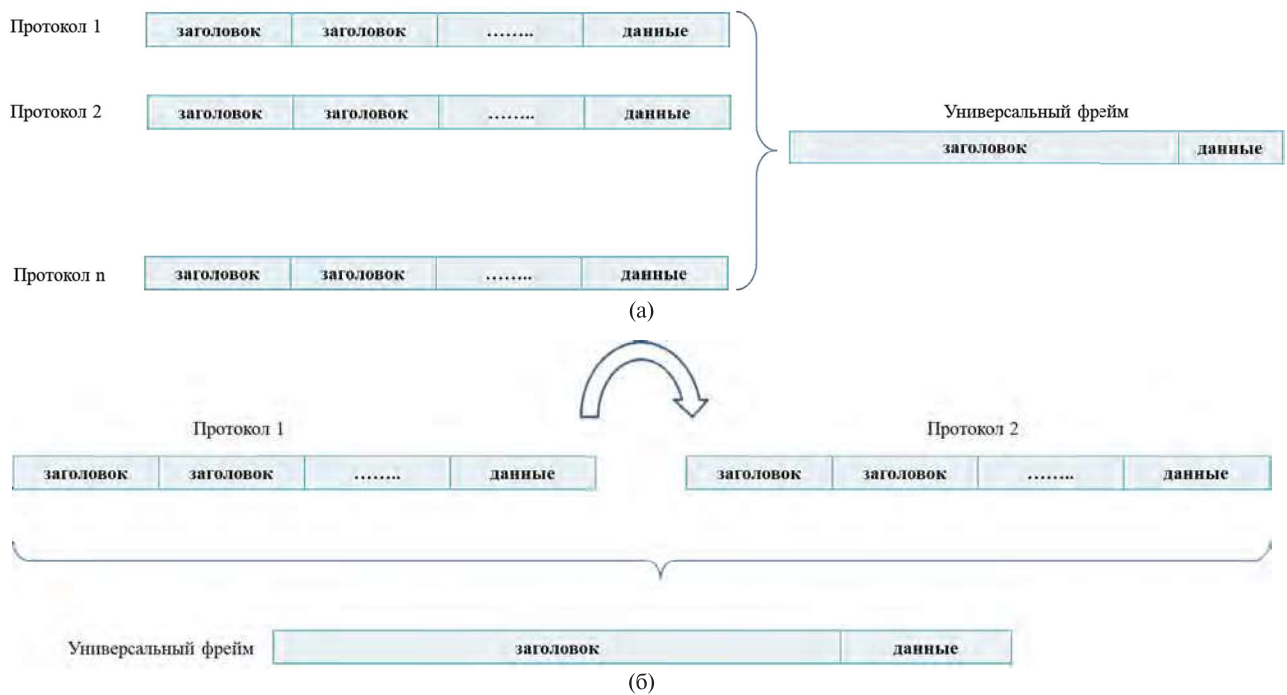


Рис. 1. Универсальная методика (а), Методика посредника (б)

Таблица 1. Формат кадров протоколов (ZigBee, Wi-Fi, WirelessHART) на канальном уровне

Стандарт \ Поле	ZigBee	Wi-Fi	WirelessHART
Полезная нагрузка (payload)	0 до 127 байт	0 до 2312 байт	до 127 байт
Заголовок	(Управление кадром) 2 байт	(Управление кадром) 2 байт	(Управление кадром) 1 байт
Заголовок	Порядковый номер 1 байт	(Длительность идентификатора) 2 байт	Порядковый номер 1 байт
Заголовок	-	(Управление очередностью кадров) 2 байт	-
Заголовок	Поле адреса 0 до 20 байт	(4 адреса) 24 байт	Поле адреса 2 или 8 байтов (источника) 2 или 8 байтов (назначения)
Заголовок	-	-	Идентификатор сети 2 байт
Заголовок	-	-	Спецификатор адреса 1 байт
Заголовок	-	-	Тип DLPDU 1 байт
Заголовок	-	-	Код целостности сообщения (MIC) 4 байт
Заголовок (контрольная сумма)	2 байт	4 байт	2 байт

состоит из общих служебных полей фиксированной длины, размещенных в заголовках, таких как: управление кадром, контрольная сумма, поле адреса, порядковый номер, длина идентификатора, управление очередностью кадров и других информационных (смысловых) полей, переносящих собственно пользовательские данные, таких как полезная нагрузка переменной длины. В соответствии с предложенными методиками, универсальный кадр должен содержать все служебные поля кроме смыслового поля максимальной длиной (здесь мы ограничиваем служебные и смысловые поля по максимальному размеру) для того, чтобы любой из этих стандартов мог инкапсулироваться в новом кадре и деинкапсулироваться обратно.

На основе этого, получается общий кадр канального уровня изучаемых стандартов, который соответствует первой методике унификации показан на табл. 2. В таблицах 3, 4, 5, показаны кадры данных методикой посредника.

Для оценки эффективности предложенных методик унификации и в качестве критерия эффективности, рассчитаем соотношение размера заголовков к общему размеру кадра. Соотношение эффективности показано в табл. 6.

При сравнении соотношений эффективности (табл. 6), заметим, что, лучшее соотношение (более высокое) получено при применении методики посредника для пары протоколов ZigBee и WirelessHART.

Таблица 2. Общий универсальный кадр данных (для любого количества протоколов)

Управление кадром	Порядковый номер	Длина идентификатора	Управление очередностью кадров	Поле адреса	Идентификатор сети	Спецификатор адреса
2 байт	1 байт	2 байт	2 байт	до 24 байт	2 байт	1 байт
Тип DLPDU	Код целостности сообщения (MIC)	Полезная нагрузка	Контрольная сумма			
1 байт	4 байт	до 2312 байт	до 4 байт			

Таблица 3. Кадр данных (методика посредника) для пары ZigBee и Wi-Fi

Управление кадром	Порядковый номер	Длина идентификатора	Управление очередностью кадров	Поле адреса	Полезная нагрузка	Контрольная сумма
2 байт	1 байт	2 байт	2 байт	до 24 байт	до 2312 байт	до 4 байт

Таблица 4. Кадр данных (методика посредника) для пары ZigBee и WirelessHART

Управление кадром	Порядковый номер	Длина идентификатора	Управление очередностью кадров	Поле адреса	Идентификатор сети	Спецификатор адреса
2 байт	1 байт	2 байт	2 байт	до 20 байт	2 байт	1 байт
Тип DLPDU	Код целостности сообщения (MIC)	Полезная нагрузка	Контрольная сумма			
1 байт	4 байт	до 127 байт	до 2 байт			

Таблица 5. Кадр данных (методика посредника) для пары Wi-Fi и WirelessHART

Управление кадром	Порядковый номер	Длина идентификатора	Управление очередностью кадров	Поле адреса	Идентификатор сети	Спецификатор адреса
2 байт	1 байт	2 байт	2 байт	до 24 байт	2 байт	1 байт
Тип DLPDU	Код целостности сообщения (MIC)	Полезная нагрузка	Контрольная сумма			
1 байт	4 байт	до 2312 байт	до 4 байт			

Таблица 6. Соотношение размера заголовков к общему размеру кадра

Методика унификации	Соотношение = размер заголовков / общий размер кадра
1. Универсальная методика (для любого количества протоколов).	$C = 43/2344 = 0.018$
2. Посредник для пары протоколов ZigBee и Wi-Fi.	$C = 35/2347 = 0.0149$
3. Посредник для пары протоколов ZigBee и WirelessHART.	$C = 37/164 = 0.225$
4. Посредник для пары протоколов Wi-Fi и WirelessHART.	$C = 37/2355 = 0.0157$

Следовательно, можем считать, что эта методика эффективнее универсальной методики (в том числе и для остальных пар протоколов). Заметим также, что стандарт Wi-Fi имеет значительные отличия от прочих стандартов, которые базируются на IEEE 802.15.4. Wi-Fi имеет существенно больший размер кадра, т.е. сравнивать его с остальными стандартами не вполне корректно и неэффективно. Таким образом, можно заключить, что для трёх изучаемых стандартов, методика унификации форматов «посредник» более эффективна, чем универсальная методика, но при этом не позволяет обобщить формат кадров для всех стандартов семейства IEEE.

**Выводы**

Интероперабельность и совместимость стандартов БСС является важным фактором для реализации концепции индустрии 4.0. Хотя существуют некоторые научные разработки в этой области, до сих пор отсутствует единый стандарт протокола связи, который объединил бы кадры данных различных протоколов. Анализ стандартов беспроводных сенсорных сетей позволяет описать кадры данных; исходя из этого были предложены 2 методики для унификации кадров данных для 3 стандартов БСС. В результате предварительного анализа изучаемых стандартов оказалось, что методики «посредник» эффективнее универсальной методики унификации с точки зрения соотношения размера заголовков к общему размеру кадра. На основании этого, дальнейшая работа будет сосредоточена на создание программной реализации унификации кадров сетей ZigBee и WirelessHART (по методике «посредника») с возможностью расширения анализа на иные стандарты БСС.

*Сосенушкин Сергей Евгеньевич* — канд. техн. наук, доцент кафедры информационных систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
 ss@stankin.ru

*Юсеф Фарах* — аспирант кафедры информационных систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
 farahjousef@gmail.com

*Sosenushkin Sergey Evgenyevich* — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of «Information Systems» of MSUT «STANKIN»  
 ss@stankin.ru

*Yousef Farah* — PhD student at the sub-department of «Information Systems» of MSUT «STANKIN»  
 farahjousef@gmail.com

**Библиографический список**

1. **Chaari L.**, and **Kamoun L.** IEEE 802.15.4/Zigbee Performance Analysis for Real Time Applications Using OMNET++ Simulator, Communications in Computer and Information Science, 2011, pp. 54–68.
2. **Ehrlich M.**, **Wisniewski L.** and **Jasperneite J.** State of the Art and Future Applications of Industrial Wireless Sensor Networks, Kommunikation Und Bildverarbeitung in Der Automation, 2017, pp. 28–39.
3. **Devan P.**, **Hussin F.**, **Ibrahim R.**, **Bingi K.** and **Khanday F.** A Survey on the Application of WirelessHART for Industrial Process Monitoring and Control, Sensors 2021, 21, 4951.
4. Промышленные сети и интерфейсы [Электронный ресурс]. Режим доступа: // [https://bookasutp.ru/Chapter2\\_11\\_2.aspx#ZigBee](https://bookasutp.ru/Chapter2_11_2.aspx#ZigBee) (дата обращения 23.09.2021).
5. Стек протоколов IEEE 802.11 [Электронный ресурс]. Режим доступа: // <https://studfile.net/preview/5685685/page:37/> (дата обращения 12.10.2021).
6. Теоретические сведения о построении и принципах функционирования сети стандарта 802.11 [Электронный ресурс]. Режим доступа: // <http://omoled.ru/Content/uploaded/dir12/Изучение сигналов физического уровня PLCP стандарта 802.11a.pdf> (дата обращения 19.10.2021).
7. Промышленные сети и интерфейсы: 2.11. Беспроводные локальные сети: 2.11.4 Wi-Fi и IEEE 802.112 [Электронный ресурс]. Режим доступа: // [https://www.bookasutp.ru/Chapter2\\_11\\_4.aspx/](https://www.bookasutp.ru/Chapter2_11_4.aspx/) (дата обращения 30.09.2021).
8. **Vayou L.** Assessment and enforcement of wireless sensor network-based SCADA systems security [Electronic version]. Available at: // <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02057992/document> (accessed 25.09.2021).

---

# РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 681.5.07

А.А. Зеленский  
A.A. Zelensky

## КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ДОВЕРЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

ЧАСТЬ 1. МОДЕЛИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ  
И КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ  
И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

## COMPLEX SYNTHESIS METHODOLOGY OF HIGH-SPEED TRUSTED INDUSTRIAL MOTION CONTROL SYSTEMS OF ROBOTS AND MECHATRONIC SYSTEMS

PART 1. PROBLEM SOLVING MODELS AND INTEGRATED  
METHODOLOGY OF SYNTHESIS OF MOTION CONTROL SYSTEMS  
OF INDUSTRIAL ROBOTS AND MECHATRONIC SYSTEMS

*Исследуется проблема синтеза доверенных систем управления движением реального времени. Предлагается многоуровневая комплексная методология, включающая в себя модель решения проблемы синтеза системы управления реального времени в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки задачи до уровня электронного устройства, методологию определения архитектуры системы управления, языка, методов и среды ее программирования, а также методологии синтеза подсистем управления. Сформулированы основные проблемы повышения производительности, которые решаются за счет использования память-центрической архитектуры системы управления. Определены основные подходы к программированию и формированию интегрированной среды программирования доверенных память-центрических систем управления реального времени промышленных роботов и других мехатронных систем.*

*The problem of synthesis of trusted real-time motion control systems is investigated. A multilevel complex methodology is proposed, which includes a model for solving the problem of synthesis of a real-time control system in the form of a sequential multilevel transformation from the formulation of the problem to the level of an electronic device, a methodology for determining the architecture of the control system, the language, methods and environment of its programming, as well as a methodology for the synthesis of control subsystems. The main problems of increasing productivity are formulated, which are solved by using the memory-centric architecture of the control system. The main approaches to programming and the formation of an integrated programming environment for trusted memory-centric real-time control systems of industrial robots and other mechatronic systems are defined.*

**Ключевые слова:** методология, синтез, управление движением, промышленный робот, мехатронная система, память-центрическая архитектура, программирование.

**Keywords:** methodology, synthesis, motion control, industrial robot, mechatronic system, memory-centric architecture, programming.



**ВВЕДЕНИЕ**

Прорывным направлением научно-технологического развития России и ведущих стран мира в последние десятилетия являются системы управления технологическим оборудованием, в том числе системы, работающие в реальном времени. Наличие у страны компетенций в данной технологической области является одним из определяющих факторов ее глобальной конкурентоспособности и безопасности.

Наряду с задачей обеспечения быстродействия систем управления, возникающей при формировании систем управления реального времени, в контексте проблематики технологической независимости и национальной безопасности встает проблема доверия к системам управления, в свою очередь ведущая к проблеме импортозамещения в условиях имеющегося технологического отставания в области производства необходимой электронно-компонентной базы.

Проблема синтеза доверенной системы управления реального времени для промышленных роботов и других мехатронных систем – многопараметрическая, требующая для своего решения учета множества технических, технологических и экономических (в части обеспечения необходимыми комплектующими по приемлемой цене) факторов. Для решения данной проблемы необходимо создать упорядоченную комплексную методологию, которая регламентирует последовательность решения задач синтеза и позволит сократить вариативность при решении каждой из этих задач.

**2. МОДЕЛИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Известным подходом к проблеме синтеза системы управления (СУ) является модель, основанная на представлении решения проблемы в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки задачи до исполнительного физического уровня, в нашем случае – уровня электронных устройств.

В различных работах предлагается комплекс уровней преобразования, обязательно включающих уровень алгоритмов, программный уровень, уровень ISA (архитектура набора инструкций – согласованный интерфейс для обмена данными), уровень микроархитектуры системы управления (набор аппаратных структур, посредством которых реализуется ISA), уровень схем и уровень электронных устройств [1]. Иногда комплекс уровней преобразования дополняют уровнем программной среды (Runtime System) – операционной системы, виртуальной машины и т. д., а также уровнем логики (в виде моделей и в виде логических элементов).

На рисунке 1 представлена обобщающая модель решения проблемы синтеза системы управления, основанная на расширенном комплексе уровней преобразования (LevelsofTransformation).



**Рис. 1.** Модели решения проблемы синтеза системы управления реального времени в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки задачи до уровня электронного устройства:

*а – синтез СУ исходя из поставленной проблемы; б – синтез СУ исходя из поставленной проблемы и доступных электронных устройств; в – синтез СУ исходя из поставленной проблемы, доступных устройств и выбранной оптимальной микроархитектуры*

Можно выделить три основных варианта реализации данной модели. Базовой моделью является модель решения проблемы синтеза исходя исключительно из поставленной проблемы синтезировать систему управления для заданного объекта управления, для которого известны требования по набору выполняемых операций, быстродействию, точности и т. д. Для решения поставленной проблемы определяются все уровни системы. При этом положительный результат синтеза не может быть гарантирован, поскольку требования к нижним уровням (за счет которых реализуются верхние) могут оказаться нереализуемыми. Например, для выполнения заданных вычислительных алгоритмов в режиме реального времени может потребоваться быстродействие электронных устройств, которое при современном уровне развития технологий не может быть обеспечено.

Примером практического построения системы управления в соответствии с данным вариантом модели являются многопроцессорные вычислительные комплексы «Эльбрус» и «Эльбрус-2», разработанных под руководством В.С. Бурцева. В таблице 1 представлено описание реализации модели решения проблемы синтеза для указанных вычислительных комплексов.

Частично решение проблемы обеспечения практической реализуемости системы управления достигается за счет учета функциональных свойств доступных электронных устройств (2-ой вариант решения проблемы синтеза системы управления). При этом, однако, не предполагается оптимизация синтеза: найденное решение проблемы синтеза системы управления может оказаться неоптимальным по быстродействию и точности. Во многих случаях данная модель вообще не позволит найти решение поставленной задачи в пределах установленных ограничений. Это

связано с тем, что число вариантов реализации на каждом из уровней модели существенно, и в целом разнообразие вариантов системы управления с различными алгоритмами, программами, вариантами реализации программной среды, наборами инструкций для обмена данными, микроархитектурами, логикой и схемами может оказаться столь большим, что их исчерпывающий сравнительный анализ на практике не представляется возможным.

Близкой к оптимальной (квазиоптимальной), исходя из функциональных и технологических особенностей объекта управления в виде промышленных роботов и мехатронных системам контурной обработки, является реализация третьего варианта модели решения проблемы синтеза, в которой наряду с проблемой и функциональными ограничениями электронных устройств также определена архитектура системы управления. Выбор архитектуры в качестве уровня (комплекса уровней) дополнительной конкретизации системы управления обусловлен двумя обстоятельствами:

Во-первых, выбор оптимальной архитектуры — задача, имеющая решение, напрямую вытекающее из специфики системы управления. Эта специфика заключается в необходимости обеспечения высокоскоростного прецизионного контурного управления движением исполнительного органа промышленных роботов и мехатронных систем в реальном времени с обеспечением всего спектра современных и перспективных функциональных и пользовательских возможностей, а также в обеспечении высокого уровня доверия к функциональной надежности и информационной безопасности системы управления. Указанные обстоятельства предъявляют критические требования к быстродействию системы управления, реализуемому в пределах жестко ограниченных тех-

нологией (контурная точность/скорость) интервалов времени, называемых циклом управления.

В условиях ограничения быстродействия электронной компонентной базы (пока не созданы вычислительные структуры на основе новых физических принципов, например, оптические или квантовые процессоры, мемристорные структуры, иные устройства с аналогичным потенциалом) единственным способом повышения быстродействия в среднесрочной перспективе является использование предметно-ориентированных параллельных вычислений. Таким образом, оптимальная архитектура систем управления технологическим оборудованием, в частном случае, систем управления движением промышленных роботов и мехатронных систем контурной обработки, как наиболее вычислительно сложных в условиях жесткого реального времени, должна обеспечивать реализацию принципа параллельных вычислений. В качестве дополнительных требований к архитектуре, позволяющих обеспечить встраиваемость и работу в замкнутых промышленных условиях системы в целом, ставятся задача преодоления трех стен, ограничивающих быстродействие вычислительных машин: стены мощности, стены частоты и стены памяти [3]. Как будет показано далее, практической реализацией оптимальной (исходя из поставленных задач) архитектуры системы управления является память-центрическая архитектура.

Во-вторых, уровень (комплекс уровней) архитектуры вносит наибольший вклад в вариативность системы управления. Конкретизация системы управления на этом уровне (комплексе уровней) делает последующее определение уровней системы управления ограниченным, что обеспечивает достоверность конечного результата синтеза с точки зрения достижения оптимального решения.

Таблица 1. Реализация модели решения проблемы синтеза для вычислительных комплексов «Эльбрус» и «Эльбрус-2»

Уровень преобразования	Описание реализации
Проблема	Решаемая проблема формулировалась как создание эффективной системы ПРО (противоракетной обороны) с производительностью не менее 100 млн операций в секунду.
Алгоритм	Используемый для решения поставленной проблемы алгоритм основан на создании многопроцессорного вычислительного комплекса.
Программа/Язык	Для реализации заданного алгоритма был сформирован специальный язык — система команд [2, стр. 59]
Программная среда	Специально созданная операционная система МВК «Эльбрус» [2, стр. 120]
Микроархитектура	Типовая ячейка МВК «Эльбрус-2», состоящая из сборок мультичипов и микросхем ИС-100
Логика/Схемы	Система управления (вычислительный комплекс) на задачах быстрого преобразования Фурье обеспечивала производительность порядка 600 млн. операций в секунду, а на задачах уравнений математической физики — производительность, близкую к миллиарду операций в секунду. Для этого были разработаны спецпроцессоры, воспроизводящие команды БЭСМ-6 (процессор СВС), процессор быстрого преобразования Фурье (БПФ) и векторный процессор МВК «Эльбрус-2».

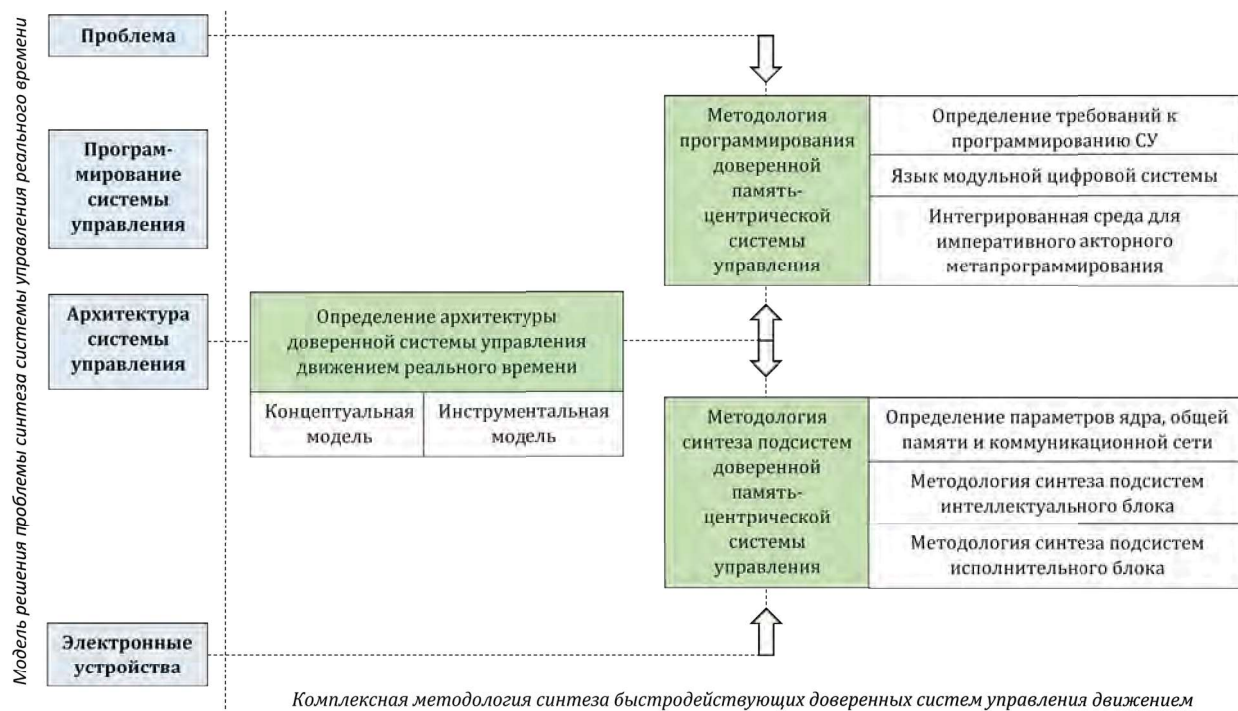


Рис. 2. Комплексная методология синтеза быстродействующих доверенных систем управления движением

При выборе третьего (квазиоптимального) варианта модели решения проблемы синтеза системы управления реальным временем вся процедура синтеза может быть представлена в виде комплексной методологии (рис. 2), в рамках которой решаются две автономные задачи, которые коррелируют между собой, но решаются по отдельности: задача структурного синтеза системы управления движением в реальном времени и задача программирования системы управления движением в реальном времени.

Задача структурного синтеза системы управления движением в реальном времени, в свою очередь, распадается на два этапа:

На первом этапе необходимо исходя из требований повышения быстродействия, обеспечения доверия и преодоления существующих ограничений для вычислительных систем определить квазиоптимальную архитектуру системы управления для выбранного объекта управления (промышленного робота или другой мехатронной системы). Как будет показано, такой квазиоптимальной архитектурой является память-центрическая архитектура.

Далее необходимо сформировать концептуальную модель память-центрической системы управления, определяющей комплекс функциональных модулей и элементов, формирующих систему управления, а также выбрать инструментальную модель, наилучшим образом отвечающую характеру функционирования системы управления.

На втором этапе в рамках установленного архитектурного ограничения и заданных критериев опти-

мального синтеза осуществляется синтез подсистем управления (функциональных блоков и модулей системы управления движением) — разрабатываются математические модели и определяется практическая реализация подсистем. Комплексы блоков, модулей и элементов для различных мехатронных систем могут существенно различаться, поэтому синтез подсистем управления на данном этапе характеризуется высокой вариативностью.

Решение задачи программирования системы управления движением в реальном времени — это определение исходя из выбранной (память-центрической) архитектуры системы управления уровней, промежуточных между проблемой и архитектурой. Для этого необходимо определить требования к программированию доверенной системы управления реального времени и сформировать (или выбрать) на базе этих требований язык программирования и интегрированную среду программирования.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ДОВЕРЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Возможности повышения быстродействия систем управления за счет быстродействия электронно-компонентной базы в настоящее время сильно ограничены. Это связано с невозможностью (в силу физических причин) дальнейшего существенного уменьшения проектных норм (менее 2–3 нм) [4], а также с резким сокращением (вследствие санкций со стороны США и стран, аффилированных США)

объемов российского импорта необходимых электронных компонентов и оборудования для их производства. В этих условиях целесообразным представляется достижение цели повышения производительности вычислительных машин за счет совершенствования их архитектуры.

Сформулируем основные задачи повышения производительности, имеющие решение за счет совершенствования архитектуры вычислительных машин [5]:

1 задача. Необходимо уменьшить объем обрабатываемого потока данных. В настоящее время эта задача решается за счет использования параллельных вычислений с применением сопроцессоров (векторных, матричных, тензорных и др.) или ускорителей (графических, SoC и др.), которым передается (перехватывается сопроцессором или передается ускорителю командой центрального процессора) часть вычислительной работы.

2 задача. Необходимо увеличить скорость передачи данных между элементами вычислительной машины. Это может быть достигнуто за счет уменьшения расстояний между элементами, что расширяет возможности использования параллельного и секционного доступа к шине данных. Уменьшение расстояний при размещении всех элементов на одном чипе достигается в системах на кристалле (SoC). Снижение объема передачи данных и существенное увеличение скорости передачи данных между элементами вычислительной системы возможно за счет применения технологий обработки в памяти [6] или обработки вблизи памяти (NMC) [7].

3 задача. Необходимо устранить очереди при одновременном обращении к одной памяти нескольких вычислительных устройств. Наибольший потенциал повышения быстродействия систем управления движением связан с использованием физического разделения памяти, обеспечивающего окончательное решение проблемы очередей, а также не требующее усложнения и повышения стоимости вычислительной системы.

В работе [5] предложена концептуальная модель системы управления движением промышленного робота, состоящая из следующих элементов:

- ядро системы управления движением, имеющее техническую реализацию в виде микроконтроллера на базе Soft-процессора архитектуры фон Неймана (MCU) или компьютера;

- блок очувствления, включающий систему технического зрения и модуль обработки аналоговых и дискретных входов, по которым в систему управления поступают данные с датчиков и информация от сенсоров;

- исполнительный блок, включающий в себя модули для кинематических, динамических и других вычислений, необходимых для управления движением в промышленном роботе, а также регуляторы исполнительных устройств;

- интеллектуальный блок, включающий в себя человеко-машинный интерфейс (ММИ), обеспечивающий взаимодействие с системой управления человека-оператора, а также различные функциональные модули, построенные на базе искусственной нейронной сети (ИНС).

- оперативная память системы управления, состоящая из динамической памяти с произвольным доступом (DRAM), статической памяти с произвольным доступом (SRAM), а также дополнительной виртуальной памяти в виде RAM-диска.

- коммуникационная сеть, представляющая собой систему цифровых и аналоговых каналов связи, коммутационного оборудования и устройств для преобразования сигналов (цифро-аналоговых, аналогово-цифровых и др.).

Данная концептуальная модель системы управления движением является память-центрической, т. е. реализует память-центрическую архитектуру вычислений, при которой данные в процессе вычислений не перемещаются между процессором и памятью (что требует затрат времени, энергии и ограничено пропускной способностью каналов связи), а остаются в памяти, в которую интегрируется процессор.

Сформулированные основные задачи повышения производительности в данном случае решаются следующим образом:

1. Задача уменьшения объема обрабатываемого потока данных решается за счет использования дополнительных вычислительных модулей — сопроцессоров и ускорителей, выполняющих параллельные вычисления.

2. Задача увеличения скорости передачи данных между функциональными элементами и блоками системы управления решается путем использования памяти-центрической архитектуры (PIM). Все устройство, для работы которых необходима высокая скорость обмена данными с памятью, интегрируются в память (каждое устройство в свою локальную оперативную SRAM или DRAM память).

3. Задача устранения очередей решается путем аппаратного разделения оперативной памяти на локальные области, доступные только одному устройству. Взаимодействие между устройствами осуществляется в высокоскоростной мультипортовой статической памяти с использованием минимальных объемов данных.

#### 4. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ДОВЕРЕННОЙ ПАМЯТЬ-ЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Для полного использования системы управления движением с память-центрической архитектурой ее программное обеспечение должно удовлетворять нескольким базовым требованиям:

- язык программирования должен быть предметно-ориентированным, специализированным для управления движением;

— поскольку модули системы управления обладают существенной автономией и разнородными свойствами, для задания алгоритмов их работы (распределения задач между модулями) необходимо использовать декларативное программирование, включающее в себя элементы функционального и логического программирования;

— при программировании должна реализовываться акторная инструментальная модель, наилучшим образом соответствующая архитектуре и характеру взаимодействия элементов системы управления движением промышленного робота, станка с ЧПУ или мехатронной системы;

— для обеспечения быстродействия и компактности программного кода, а также оптимального использования ресурсов общей памяти системы управления при работе в режиме реального времени необходимо, чтобы используемый язык программирования был языком ассемблера (высокого уровня) или интерпретируемым языком;

— значимыми инструментами повышения функциональной надежности и информационной безопасности систем управления движением являются децентрализация управления и локализация обмена данными в отдельных модулях системы управления; данные свойства системы управления должны получить программную реализацию.

Все установленные требования к программированию память-центрической системы управления движением могут быть удовлетворены при использовании языка модульной цифровой системы, разработанного в МГТУ «СТАНКИН» и использованного в СЧПУ «Перспектива» [8, 9]. СЧПУ «Перспектива» имеет модульный принцип построения. Специально для нее была разработана система унифицированных электронных модулей (Модульная Цифровая Система — «МЦС»), позволяющая строить и в дальнейшем наращивать системы программного управления различным технологическим оборудованием и другими техническими объектами. Системой ЧПУ «Перспектива» были оснащены обрабатывающие центры СА535 (производитель — Станкозавод «Саста», Рязанская обл.), S500 (производитель — НПО «Станкостроение», г. Стерлитамак), КВС В4 (производитель — АО «КЭМЗ», г. Ковров), а также технологические роботы (производитель — ВМЗ АО «АВТОВАЗ»).

Классификационная модель разработанного языка включает в себя следующие критерии классификации (классификационные основания):

— по специализации языка: предметно-ориентированный — язык программирования систем управления движением роботов, станков с ЧПУ и других мехатронных систем;

— по парадигме программирования: язык декларативного программирования;

— по методологии программирования: язык функционального и логического программирования;

— по реализации акторной модели: за счет метапрограммирования;

— по способу преобразования исходного программного кода в машинный код: интерпретируемый язык программирования;

— по инструментам повышения доверия: за счет децентрализованной архитектуры программ и за счет локализации переменных.

Специфика интегрированной среды разработки программ для доверенных систем управления движением реального времени определяется следующими факторами:

— система управления имеет память-центрическую архитектуру, предполагающую параллельное выполнение операций с минимальным обменом данными между процессами;

— функциональные модули системы управления обладают широкой автономией, строятся на базе различных вычислительных технологий и программируются на различных языках с использованием встраиваемых библиотек;

— в системе управления используется акторная инструментальная модель, реализуемая посредством метапрограммирования; каждому актору соответствует отдельная программа, запускаемая в локальной памяти автономно функционирующего модуля системы управления, либо программа в общей памяти системы управления.

Указанная специфика определяет дополнительные требования к интегрированной среде разработки. Это должна быть среда акторного метапрограммирования, обладающая функционалом параллельного программирования, т. е. одновременного редактирования, проверки и отладки нескольких программ, работающих взаимосвязано, запускаемых и/или инициализируемых одна через другую.

Функционал интегрированной среды метапрограммирования включает в себя реализацию двух базовых техник метапрограммирования: многоэтапное метапрограммирование [10] и метаязыковую абстракцию [11]. Многоэтапное программирование (MSP) — это техника метапрограммирования, основанная на разделении компиляции на ряд промежуточных стадий. В языках MSP выражения квалифицируются нотацией, которая указывает фазу, на которой они должны быть оценены на допустимость создаваемых типов и их соответствие системе типов. Метаязыковая абстракция — техника решения сложных задач путём создания нового языка или создания словаря с целью лучшего понимания предметной области. Такие языки в настоящее время называют языками предметной области (DSL — Domain Specific Languages).

В основу интегрированной среды разработки программ для созданных в МГТУ «СТАНКИН» систем управления движением положен язык модульной цифровой системы. Это язык декларативного программирования, интегрирующий синтаксические

элементы универсальных языков программирования (C, C++ и др.), а также макроязыков (G-коды и др.). Ввиду необходимости использования для управления автономными акторами, связанными со специализированными функциональными блоками системы управления движения, различных статических и динамических библиотек на различных языках, в интегрированной среде программирования в полном объеме реализуется техника метаязыковой абстракции. В данном случае техника включает в себя набор необходимых компиляторов и интерпретаторов, работающих как при финализации и эмуляции программного обеспечения, так и в процессе проверки и отладки.

Несмотря на то, что в данной среде метапрограммирования не предполагается создание программ, изменяющихся в процессе работы (все эмулируемые программы уже созданы и загружаются в процессе работы центральной программы по необходимости), тем не менее, итоговая сложность комплекса параллельно функционирующих и обменивающихся данными программ требует обязательного использования техники многоэтапного метапрограммирования. В процессе проверки и отладки комплекса программ на тестовых задачах выявляются ошибки работы программ, в том числе в передаче данных между программами.

## ВЫВОДЫ

На основании проведенного в статье анализа можно сделать следующие выводы:

1. В основу синтеза системы управления должна быть положена модель, основанная на представлении решения в виде последовательного многоуровневого преобразования от постановки задачи до уровня электронного устройства. Близкой к оптимальной является реализация третьего варианта модели решения проблемы синтеза, в которой наряду с проблемой и функциональными ограничениями электронных устройств также определена архитектура системы управления.

2. При выборе третьего варианта модели решения проблемы системы управления реального времени вся процедура синтеза может быть представлена в виде комплексной методологии, в рамках которой решаются две автономные задачи, которые коррелируют между собой, но решаются по отдельности: задача структурного синтеза системы управления движением в реальном времени и задача программирования системы управления движением в реальном времени.

3. Последовательность синтеза системы управления включает в себя определение оптимальной архитектуры для управления мехатронными системами в реальном времени; синтез структурных элементов системы управления, ограниченный выбранной оптимальной архитектурой системы управления; определение средств программной реализации системы управления.

4. Решение проблемы повышения производительности вычислений необходимо искать в области совершенствования архитектуры вычислений. Основными задачами повышения производительности, имеющими решение за счет совершенствования архитектуры вычислительных машин, являются: уменьшение объема обрабатываемого потока данных, увеличение скорости передачи данных, устранение очереди при одновременном обращении к одной памяти нескольких вычислительных устройств. Указанные задачи решаются при построении системы управления движением промышленными роботами и мехатронными системами с память-центрической архитектурой.

5. Для полного использования возможностей память-центрической системы управления программирование таких систем должно выполняться на предметно-ориентированном интерпретируемом языке, в соответствии с парадигмой декларативного программирования (с элементами методологии функционального и логического программирования), реализовывать модель акторов, а также обеспечивать повышение доверия к системе управления движением за счет децентрализованной архитектуры программ и за счет локализации переменных.

6. Указанные требования к программированию память-центрической системы управления могут быть удовлетворены при использовании (разработанного под руководством автора) предметно-ориентированного декларативного интерпретируемого языка модульной системы, реализации акторной модели посредством метапрограммирования, а также использованием инструментов децентрализации управления и локализации данных, наилучшим образом совместимых с акторной моделью с эмулируемыми программами в качестве акторов.

7. Для создания программного обеспечения и программных кодов под конкретные алгоритмы систем управления с память-центрической архитектурой необходимо формирование интегрированной среды для императивного акторного метапрограммирования, которая должна в полной мере задействовать имеющиеся в настоящее время в мировой практике инструменты интегрированной среды разработки, а также учитывать структурную и алгоритмическую специфику среды акторного метапрограммирования.

**Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (FSFS-2021-0004).**

## Библиографический список

1. **Patt, Y.** Requirements, Bottlenecks, and Good Fortune: Agents for Microprocessor Evolution / Proceedings of the IEEE, Vol. 89, № 11, 2001, pp. 1553–1559.

2. **Бурцев В.С.** Параллелизм вычислительных процессов и развитие архитектуры суперЭВМ. МВК «Эльбрус» / М.: ИВВС РАН, 1998.
3. Cell Broadband Engine Programming Tutorial. Version 2.0 // IBM Systems and Technology Group, December 15, 2006. URL: [https://arcb.csc.ncsu.edu/~mueller/cluster/ps3/CBE\\_Tutorial\\_v2.0\\_15December2006.pdf](https://arcb.csc.ncsu.edu/~mueller/cluster/ps3/CBE_Tutorial_v2.0_15December2006.pdf)
4. **Charles E. Leiserson, Neil C. Thompson, Joel S. Emer, Bradley C. Kuszmaul, Butler W. Lampson, Daniel Sanchez, Tao B. Schardl.** There's plenty of room at the Top: What will drive computer performance after Moore's law? // Science 368, 1079 (2020). URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2020/11/Leiserson-et-al-There-s-plenty-of-room-at-the-top.pdf>
5. **Зеленский А.А., Илюхин Ю.В., Грибков А.А.** Память-центрические модели систем управления движением промышленных роботов / Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 245–256.
6. **Mark Connolly.** A Programmable Processing-in-Memory Architecture for Memory Intensive Applications // RIT Scholar Works, 5–2021. URL: <https://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=11888&context=theses>
7. **Singh G., Chelini L., Corda S., Awan A.J., Stuijk S., Jordans R., Corporaal H., Boonstra A.** Near-Memory Computing: Past, Present, and Future // August 2019, Microprocessors and Microsystems 71. URL: [https://www.researchgate.net/publication/335028505\\_Near-Memory\\_Computing\\_Past\\_Present\\_and\\_Future](https://www.researchgate.net/publication/335028505_Near-Memory_Computing_Past_Present_and_Future)
8. **Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Порядин Д.В.** Обработчик пакетов блока организации сети (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ). RU 2020613026, 06.03.2020.
9. **Зеленский А.А., Порядин Д.В., Морозкин М.С., Купцов В.Р.** Графический интерфейс системы ЧПУ «Перспектива» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ). RU 2020612698, 28.02.2020.
10. **Taha W.** A Gentle Introduction to Multi-stage Programming // DBLP. Conference Paper in Lecture Notes in Computer Science. January 2003. URL: [https://www.researchgate.net/publication/221024597\\_A\\_Gentle\\_Introduction\\_to\\_Multi-stage\\_Programming](https://www.researchgate.net/publication/221024597_A_Gentle_Introduction_to_Multi-stage_Programming)
11. **Nordmann A., Hochgeschwender N., Wrede S.** A Survey on Domain-Specific Languages in Robotics // SIMPAR 2014: Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots pp 195–206. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/211831974.pdf>

*Зеленский Александр Александрович* — канд. техн. наук, директор Института цифровых интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*zelenskyaa@gmail.com*

*Zelensky Alexander Aleksandrovich* — candidate Sc. of Engineering, Director of the Institute of Digital Intelligent Systems of MSUT «STANKIN»  
*zelenskyaa@gmail.com*

---

## ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

## APPLICATION OF HARDWARE AND SOFTWARE TO CREATE A SYSTEM FOR SCANNING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS

*В статье рассматривается задача разработки инфракрасного сканера трёхмерных объектов на базе Arduino с применением аппаратно-программных средств. Описывается область применения 3D-сканеров в робототехнике и приводятся результаты проделанной работы.*

*The article deals with the problem of developing an infrared scanner of three-dimensional objects based on Arduino using hardware and software. The field of application of 3D scanners in robotics is described and the results of the work done are presented.*

**Ключевые слова:** трёхмерное сканирование, 3D-сканер, трёхмерная модель, Arduino, трехмерное пространство.

**Keywords:** 3D-scanning, 3D-scanner, 3D-model, Arduino, 3D-space.

Технология трёхмерного сканирования появилась в конце 20-го столетия. Проектирование устройств, которые могли бы оценивать расстояние до объектов и считывать информацию об их форме, велось еще с конца 50-х годов в обстановке строжайшей секретности. Передовая наука и военные технологии в эпоху холодной войны были тесно переплетены. Многие документы и сегодня засекречены. Поэтому достоверно можно говорить только о коммерческих моделях, предложенных массовому потребителю. Они не имели широкого применения из-за низкого быстродействия, низкой разрешающей способности, больших габаритов и веса. В конце 80-х годов небольшие венчурные компании начали предлагать штучный товар — сканеры, умеющие создавать объемную картину при помощи контактных зондов. Датчики физически касались поверхности объекта тысячи раз. Соотношение между каждой точкой и сотнями других становилось основой наброска для воссоздания объема. К 1989 году несколько крупных игроков зарождающегося рынка уже имели опытные разработки, позволяющие сканировать объекты при помощи оптических технологий. Однако, в это время еще не было машин, способных обрабатывать большие объемы данных. Технологии трехмерного сканирования пришлось ждать долгих 8 лет, пока произойдет смена поколений в сфере хранения данных и скорости работы процессоров. То есть уже тогда у разработчиков была возможность оцифровывать данные об объеме любого сложного предмета, но не было компьютеров,

способных справиться с обработкой такого гигантского объема информации. Почти таким же революционным событием как выпуск компанией IBM первого персонального компьютера, было начало продаж трехмерного сканера «Replica» в 1994 году. Производство этого устройства стало возможным благодаря группе инженеров из «3D Scanners» [1]. В настоящее время трёхмерное сканирование плотно закрепилось в отраслях робототехники и мехатроники. В последние годы широкое распространение получили космические технологии сканирования и системы с использованием камер глубины и лидаров. Это связано с активным развитием таких направлений, как автономные робототехнические системы, дополненная и виртуальная реальности, медицинское сканирование, компьютерное зрение и мехатроника [2]. Также 3D-сканирование активно используется в создании карт местности, что является неотъемлемой частью систем навигации роботов [3].

Построение трёхмерных моделей пространства является актуальной научно-технической задачей в современном мире. Роботизированные системы все чаще применяются на производстве и в быту. Для корректного функционирования им нужно обладать аналогами органов чувств человека. По разным данным от 60 % до 70 % информации человек получает с помощью зрения. Поэтому одной из важнейших задач в области робототехники и мехатроники является наделение роботов зрением. Зрительный аппарат человека устроен таким образом, что глаза расположены на



некотором удалении друг от друга. Это позволяет анализировать объём наблюдаемых объектов и расстояние до них. В отдельности фотоэлементы, применяемые в фототехнике не способны дать представление об объёме. Это ставит перед инженерами новую задачу: необходимо разработать устройство, которое сможет видеть не только проекцию окружающего мира на плоскость, но и понимать, что на этом изображении находится дальше, а что ближе. Поэтому была поставлена цель разработать устройство, которое может применяться совместно с роботизированными системами в качестве их зрительного аппарата.

Основной задачей 3D-сканеров является создание трёхмерных виртуальных моделей. Принцип работы сканера основан на определении наблюдаемых объектов в пространстве и переносе их в программную среду с дальнейшим построением по полученным координатам виртуальной цифровой 3D-модели.

Основными характеристиками трёхмерных сканеров являются точность определения координат точек, разрешающая способность, диапазон сканирования, покрытие исследуемого пространства.

3D-сканеры бывают: оптические, лазерные и механические (классификация по виду чувствительного элемента); контактные и бесконтактные (классификация по технологии сканирования), в свою очередь бесконтактные сканеры делятся на пассивные и активные; а также ручные, портативные, настольные, стационарные.

Разработанный 3D-сканер работает по принципу оптической технологии сканирования с использованием инфракрасного дальномера GP2Y0A21YK0F, сканер выполнен в настольном варианте и представляет собой рабочий стол (рис. 1) с установленным на нём двухосевым кардановым подвесом (рис. 2), внутри которого устанавливается датчик. Опоры подвеса сконструированы таким образом, чтобы исключить люфт. Детали стола были распечатаны на 3D принтере Flyingbear ghost 5 с использованием программного обеспечения Ultimaker Cura. Модели для 3D-принтера разрабатывались в среде Autodesk Inventor Professional. Внешний вид устройства в сборе показан на рисунке 3.

Для поворота дальномера вокруг двух осей при сканировании (оси Y и Z, рис. 2) в конструкции предусмотрены два сервопривода (двигателя постоянного тока с системой обратной связи по углу). Управление сервоприводами осуществляется с помощью микроконтроллера Arduino Uno посредством аппаратно-программных средств Arduino IDE. Управление реализуется через сигнальный провод с помощью ШИМ сигнала.

Инфракрасный (ИК) дальномер GP2Y0A21YK0F подключен через аналоговый порт микроконтроллера. Амплитуда сигнала на выходе ИК датчика пропорциональна расстоянию до объекта  $U \in (0;5)$ . Сигнал с датчика поступает через аналого-цифровой

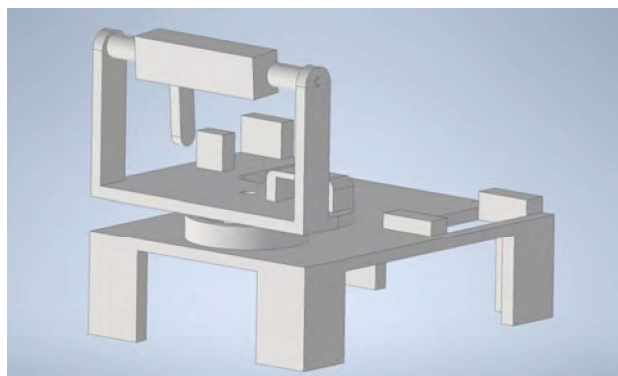


Рис. 1. Модель рабочего стола

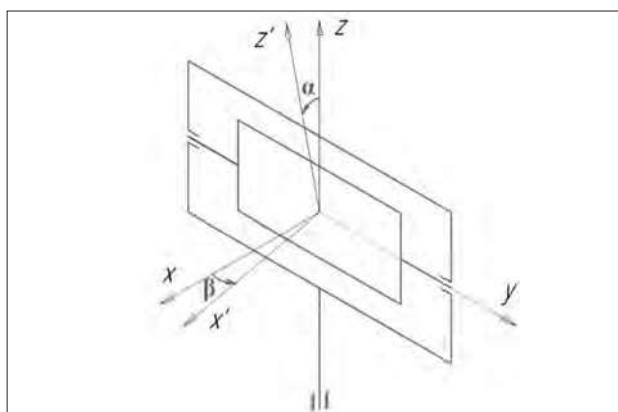


Рис. 2. Схема карданова подвеса

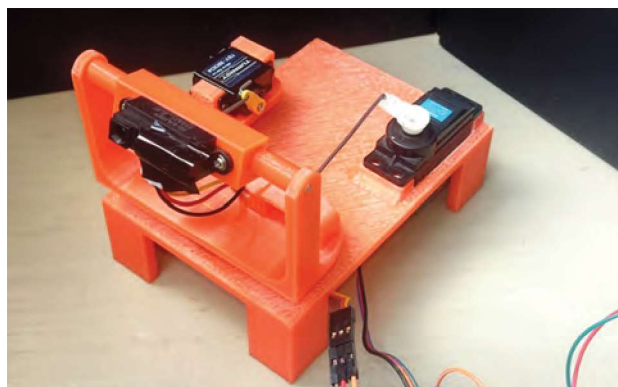


Рис. 3. Внешний вид устройства в сборе

преобразователь в микроконтроллер. Число, характеризующее амплитуду напряжения, лежит в пределах  $i \in (0;1023)$ . Преобразования производятся согласно формулам:

— число ( $i$ ) в напряжение в вольтах ( $U$ ):

$$U = 0,0048828125 \cdot i \quad (1)$$

— напряжение ( $U$ ) в расстояние ( $L$ ):

$$L = 28 \cdot U^{-1,10} \quad (2)$$

Схема подключения элементов, разработанная в Autodesk Tinkercad [4], изображена на рисунке 4.

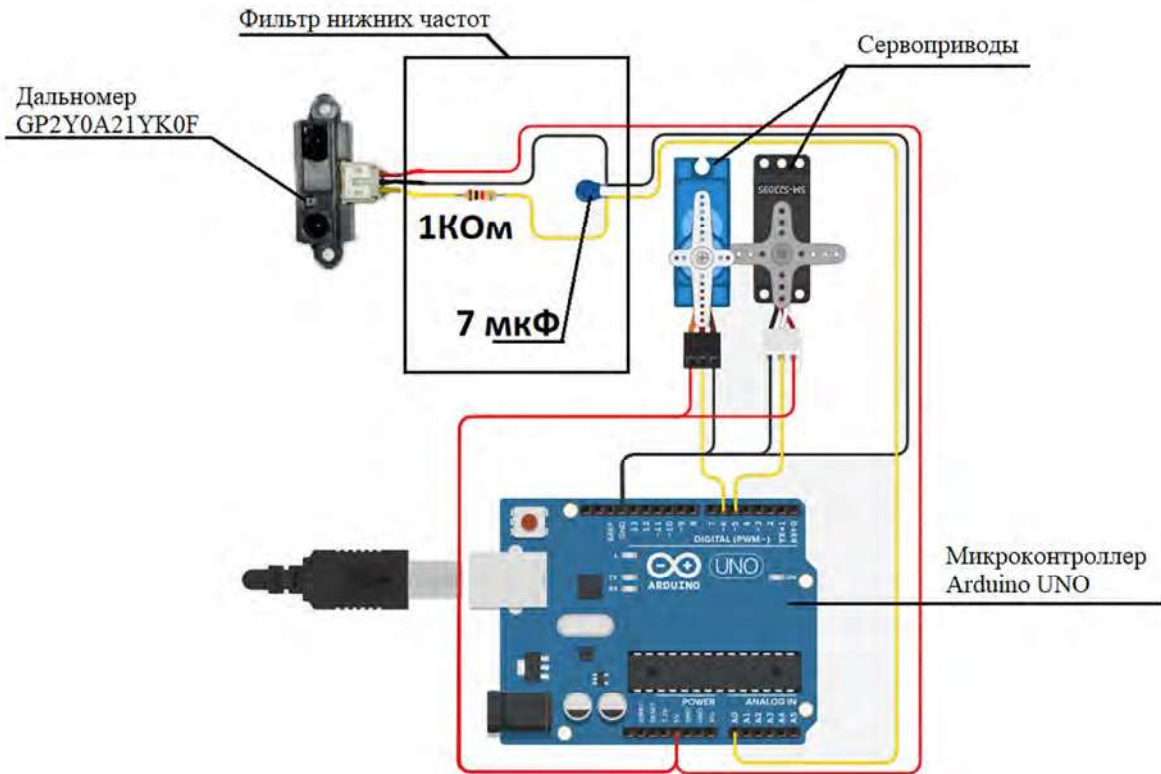


Рис. 4. Схема включения элементов

Основная проблема при реализации устройства — большое количество помех, главными источниками которых являются двигатели постоянного тока, работающие в импульсном режиме, и цифровой шум при работе ИК датчиков и системы обработки сигнала с них. Особенно сложно бороться с помехами, возникающими при коммутации якорных обмоток двигателей.

Для борьбы с такого рода помехами существуют три способа: 1) использование блока питания системы с прецизионной стабилизацией выходного напряжения; 2) фильтрация сигналов с помощью аппаратных фильтров (резистивно-емкостных и даже фильтров второго порядка); 3) использование цифровых фильтров.

Первый способ наиболее надежный, но очень дорогостоящий. Кроме того, разделение цепей питания на силовую и сигнальную приводит к увеличению массогабаритных характеристик устройства и проблемам по объединению шин «общая точка». Третий способ существенно усложняет программное обеспечение при обработке информации и снижает быстродействие системы.

Для осуществления фильтрации аппаратными и программными средствами необходимо определить диапазон частот полезного сигнала и помех. Вид сигналов, снимаемых с ИК датчиков представлен на рисунке 5.

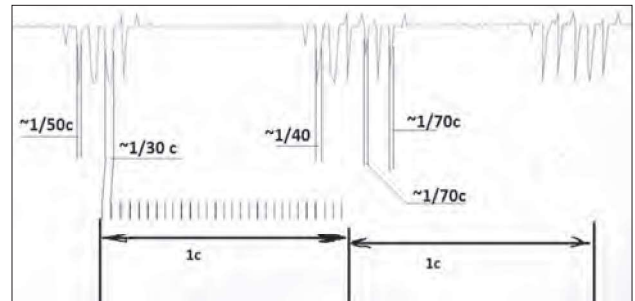


Рис. 5. Временная диаграмма сигналов с ИК датчиков

Период следования импульсов можно рассчитать по формуле:

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5}{n};$$

$$T_{cp} = \frac{\frac{1}{50} + \frac{1}{30} + \frac{1}{40} + \frac{1}{70} + \frac{1}{70}}{5} \approx 0,021c; \quad (3)$$

$$f_{cp} = \frac{1}{T_{cp}};$$

$$f_{cp} = \frac{1}{0,021} \approx 48\text{Гц},$$

где  $T_{cp}$  — осредненный период импульса,  $f_{cp}$  — осреднённая частота импульсов.

Т. к. расчет выполнен по случайной выборке, зададимся коэффициентом запаса  $\eta=2$ .

Для расчета фильтра будем использовать частоту среза расчетную  $f_p$ , которую вычислим по формуле:

$$f_p = \frac{f_{cp}}{\eta};$$

$$f_p = \frac{48}{2} = 24 \text{ Гц}$$

Входное сопротивление датчика  $R_{ex} = 100 \text{ кОм}$ . Подберем резистор для фильтра, сопротивление которого будет незначительно по сравнению с сопротивлением датчика [5]  $R_f = 1 \text{ кОм}$ . Это значение меньше собственного сопротивления датчика в 100 раз, так что включение данного резистора в схему не будет оказывать существенного влияния на его работу. Определим ёмкость конденсатора фильтра  $C$ .

$$C = \frac{1}{2\pi R_f f_p};$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 24} = 6,63 \text{ мкФ}$$

Рассчитанный фильтр размещен на схеме и подключен к датчику для уменьшения шумов.

Для получения изображения на экране компьютера используется следующий алгоритм. Изначально рамка находится в крайнем положении:  $\alpha = \pi/4$ ,  $\beta = \pi/4$  (рис. 2). После запуска программы происходит получение значения о расстоянии до объекта. Если сканируемый объект еще не попал в область зрения датчика, в соответствующую ячейку памяти заносится нулевое значение. После этого сервопривод поворачивает внешнюю рамку на угол  $\Delta\beta = 1,5^\circ$ . В память записывается следующее значение о расстоянии до объекта. Каждое значение измеряется пять раз и проходит фильтрацию цифровым медианным фильтром, что повышает точность измерения. При стационарном положении внутренней рамки под углом  $\alpha$  и движущейся внутренней рамки, датчик получает значения и записывает их  $n = 60$  раз. Далее внутренняя рамка поворачивается на угол  $\Delta\alpha = 1,5^\circ$  и внешняя рамка продолжает движение в обратном направлении, которое также сопровождается запоминанием значений. В итоге в память микроконтроллера поступает 3600 значений, которые позже преобразуются в матрицу размером  $60 \times 60$ . При таком способе сканирования необходимо внести поправку для точек объекта, находящихся под углом к оси  $X$ . Поэтому полученную матрицу значений необходимо почленно умножить на корректирующую матрицу. Значения в ней вычисляются следующим образом:

$$\alpha_{ij} = \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta)$$

Где  $\alpha$  и  $\beta$  это углы поворота сканирующего устройства относительно осей  $Y$  и  $Z$  соответственно, которые оно составляло с ними в момент получения значений

о точке с индексом  $ij$ . Таким образом, после преобразования, полученные значения это ни что иное как расстояния от плоскости  $YZ$  до точек сканируемого объекта.

С помощью разработанного устройства получены результаты, представленные на рис. 6–8. Визуализация производилась в среде MATLAB путём построения трехмерных графиков.

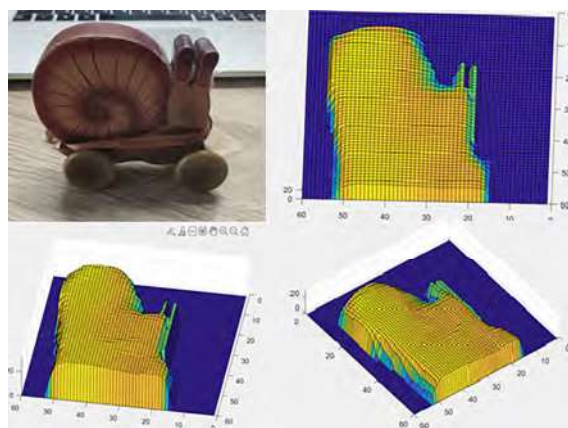


Рис. 6. Визуализация первого объекта

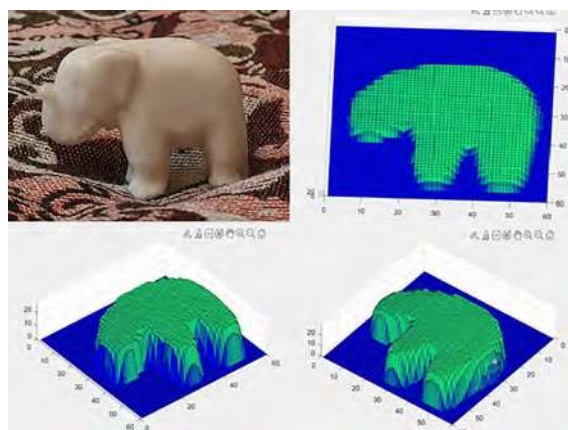


Рис. 7. Визуализация второго объекта

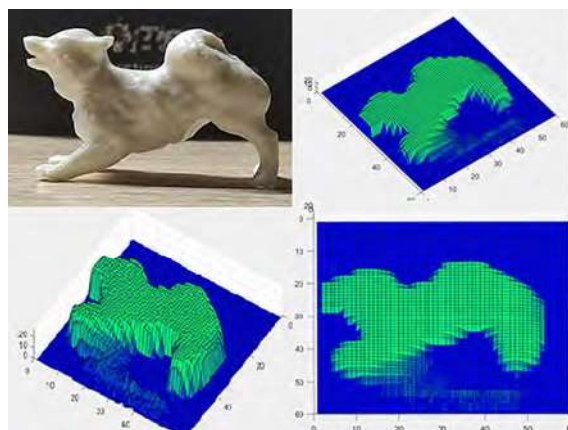


Рис. 8. Визуализация третьего объекта

В результате проведенной работы был разработан 3D-сканер, основным достоинством которого является простота конструкции и доступность комплектующих деталей при его производстве. Кроме того, использование ИК датчика открывает новые возможности сканирования пространства во вне световом спектре.

Объединение возможностей 3D-сканирования и современных роботов может найти применение в различных областях робототехники, таких как автоматизированный контроль качества изделий, распознавание образов посредством компьютерного зрения для ориентации роботов в пространстве, космических аппаратах для исследования поверхностей естественных спутников и других планет.

### Библиографический список

1. История 3D-сканеров [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://mygs.ru/blog/istoriya-3d-skanerov> (Дата обращения: 22.03.2022)
2. **Кондаратцев В.Л.** Классификация 3D-объектов, визуальный поиск по данным RGB-D / В.Л. Кондаратцев, А.Ю. Крючков, Р.М. Чумак // Умные инновации, системы и технологии. — 2021. — Вып. 217. — С. 353–375. — DOI 10.1007/978-981-33-4826-4\_24.
3. Построение локальной карты на основе 3D-LiDAR и камеры / Х. Цинь, Дж. Ли, Дж. Ван, К. Ву // Китайская конференция по управлению, CCC: 39, Шэньян, 27–29 июля 2020 года. — Шэньян, 2020. — С. 3887–3891. — DOI 10.23919/CCC50068.2020.9188499.
4. Autodesk Tinkercad — онлайн-программа 3D-моделирования [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.tinkercad.com/>
5. **Ситников А.В.** Расчет сглаживающего фильтра блока питания: метод. указания к решению задач дисциплине «Электротехника» / Ситников А.В.; МГТУ им. Н.Э. Баумана. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. — 43 с.

**Ситников Алексей Викторович** — старший преподаватель кафедры ФН7 «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана  
*sit\_irina@mail.ru*

**Курганов Вячеслав Владимирович** — обучающийся МГТУ им. Н.Э. Баумана  
*vvkurgan@mail.ru*

**Трохова Анжела Николаевна** — обучающийся МГТУ им. Н.Э. Баумана  
*trohova.anzhela@yandex.ru*

**Sitnikov Aleksey Viktorovich** — senior lecturer at the department of FN7 “Electrical Engineering and Industrial Electronics” Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
*sit\_irina@mail.ru*

**Kurganov Vyacheslav Vladimirovich** — student of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
*vvkurgan@mail.ru*

**Trohova Anzhela Nikolaevna** — student of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
*trohova.anzhela@yandex.ru*

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ ПУТЕМ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

## INCREASING THE ACCURACY OF SOLID STATE LASER RANGEFINDERS THROUGH PRIMARY DATA PROCESSING

*Представлены результаты исследования по возможности увеличения точности лазерного твердотельного дальномера VL53L01 с использованием цифровых фильтров. В качестве фильтров использовались скользящее среднее и фильтр Калмана. Для оценки возможности первичной обработки написан код для модуля с микроконтроллером STM32F103.*

*The results of a study on the possibility of increasing the accuracy of the VL53L01 laser solid-state rangefinder using digital filters are presented. The moving average and the Kalman filter were used as filters, to assess the possibility of primary processing, all code is written for a module with an STM32F103 microcontroller.*

**Ключевые слова:** лазерный дальномер VL53L01, фильтр скользящего среднего, фильтр Калмана.

**Keywords:** laser rangefinder VL53L01, moving average filter, Kalman filter.

В настоящее время происходит бурное развитие робототехники и мехатроники. Такой рост обусловлен как востребованностью таких устройств промышленностью, так и развитием микроэлектроники в целом. Одной из подзадач, которые необходимо решить при проектировании таких устройств, является разработка подсистемы определения положения робота или узла мехатронной системы в пространстве, основанной на датчиках измерения расстояния. Существует несколько подходов к разработке таких систем, но все они базируются на различных датчиках. Особенно актуальны датчики, определяющие расстояние до препятствия или предмета. Для бесконтактного определения расстояния до объекта используется следующие технологии:

- ультразвуковые датчики;
- инфракрасные датчики;
- ToF-датчики;
- лазерные датчики.

Лазерные ToF-датчики позволяют измерять расстояние с высокой точностью и высокой частотой, при этом такие датчики имеют малое энергопотребление и привлекательную цену. Такие устройства успешно применяют в областях, где необходимо измерение расстояний в пределах единиц метров, например, в бытовой и компьютерной технике. С развитием микроэлектроники появляются новые устройства и датчики, реализация которых была невозможна буквально 10 лет назад. Одним из таких примеров являются твердотельные дальномеры фирмы STMicroelectronics типа VL53L01 [1].

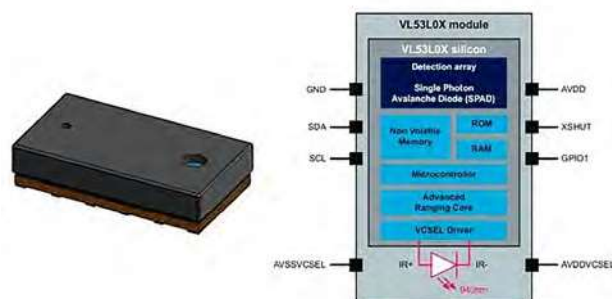


Рис. 1. Датчик VL53L0X

Этот датчик относится к классу Flight Sense и работает на принципе времяпролетной технологии Time-of-Flight (ToF). Использование такой технологии предполагает измерение время от излучения короткого импульса до приема отраженного сигнала и на основе происходит вычисление расстояния до объекта. Такой метод дает приемлемую независимость от цвета объектов и позволяет в некоторой степени компенсировать перекрестные помехи от защитного стекла.

Он может измерять абсолютное расстояние до 2 м и содержит в одном корпусе матрицу SPAD из однофотонных лавинных диодов и VCSEL-излучатель VL53L01 с длиной волны 940 нм (лазер с вертикальным резонатором). Для обработки сигнала используется запатентованная ST технология FlightSense™ второго поколения.

Применяемый лазер полностью невидим для человеческого глаза, в сочетании с внутренними физическими инфракрасными фильтрами обеспечивает большую дальность действия, более высокую устойчивость к окружающему свету и лучшую надежность для покрытия оптических перекрестных помех на стекле.

Точность датчика VL53L01 зависит от его режимов работы. Сенсор может работать в быстром режиме (менее точный) и в режиме повышенной точности (более медленный). Все характеристики по режимам работы приведены в таблице.

Производитель в технической документации приводит графики зависимости точностных характеристик от расстояния и цвета мишени. На рисунке 2 показан пример для диапазона от 50 до 1200 мм. Видно, что график линейный и разброс в каждой точке не превышает указанный в документации.

Классическим методом повышения точности и достоверности данных является их первичная цифровая обработка. Для этого используются различные цифровые фильтры, которые применяются к входным данным.

Для улучшения точности датчика VL53L01 были проведены эксперименты по цифровой фильтрации данных, получаемых с этого датчика. Все опыты проводились с использованием «Модуля для

быстрого прототипирования управления мехатронным устройством» [2], построенного на микроконтроллере stm32f103. Использование такого модуля позволило быстро разработать код и подключить требуемые периферийные устройства. Для визуальной индикации текущее измерение до и после обработки выводилось на дисплей модуля, одновременно для дальнейшей обработки данные передавались по последовательному интерфейсу на десктопный компьютер. Код был разработан в среде разработки Cube IDE на языке Си.

Для исследования был выбран наиболее популярный алгоритм цифровой фильтрации – алгоритм скользящего среднего (Simple Moving Average) [3] и фильтр Калмана. Для уменьшения вычислительной нагрузки использовался упрощенный алгоритм Калмана [4].

#### Использование скользящего среднего

Скользящее среднее – это самый простой фильтр в цифровой обработке сигналов (ЦОС), и, он получил широкое распространение на практике. Несмотря на его простоту, фильтр скользящего среднего оптимален для большинства задач: сокращения случайного шума при сохранении приемлемого результата реакции на единичный скачок, главным недостатком этого фильтра является плохая способность фильтра разделять близкие частоты в сигнале и отставание по фазе выходного сигнала [3].

Как подразумевает название, фильтр скользящего среднего работает как усреднение ряда точек входного сигнала, для расчета значения выходной точки. Этот алгоритм относится к фильтрам с конечной импульсной характеристикой (КИХ) и вычисляется по формуле

$$S_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{t-i} \quad (1)$$

где  $S_t$  – значение простого скользящего среднего в точке  $t$ ;  $n$  – количество значений исходной функции для расчёта скользящего среднего (сглаживающий интервал), чем шире сглаживающий интервал, тем более плавным получается график функции;  $p_{t-i}$  – значение исходной функции в точке  $t-i$ . Достоинством такого фильтра является высокая скорость обработки входного сигнала и малы вычислительные затраты на это.

Этот алгоритм был реализован в макете [5] и данные с датчика обрабатывались алгоритмом

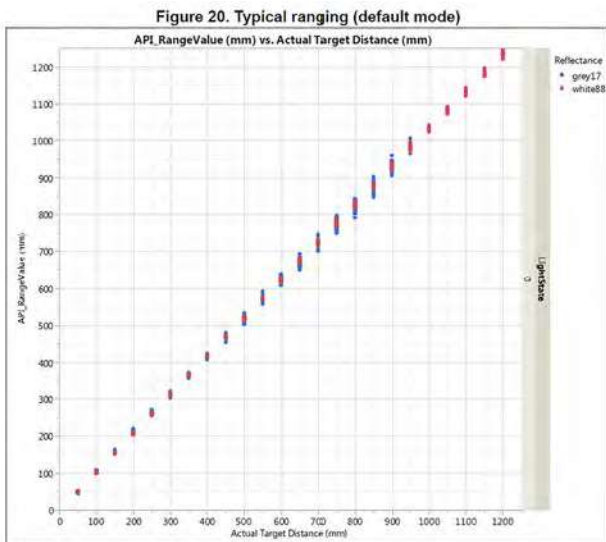


Рис. 2. Типичная точность датчика VL53L0X без обработки

Таблица. Характеристики режимов работы датчика

Режим работы	Время преобразования (мсек)	Максимальная дальность (мм)	Точность определения расстояния %
Высокая скорость	20	1200	5
Высокая точность	200	1200	3

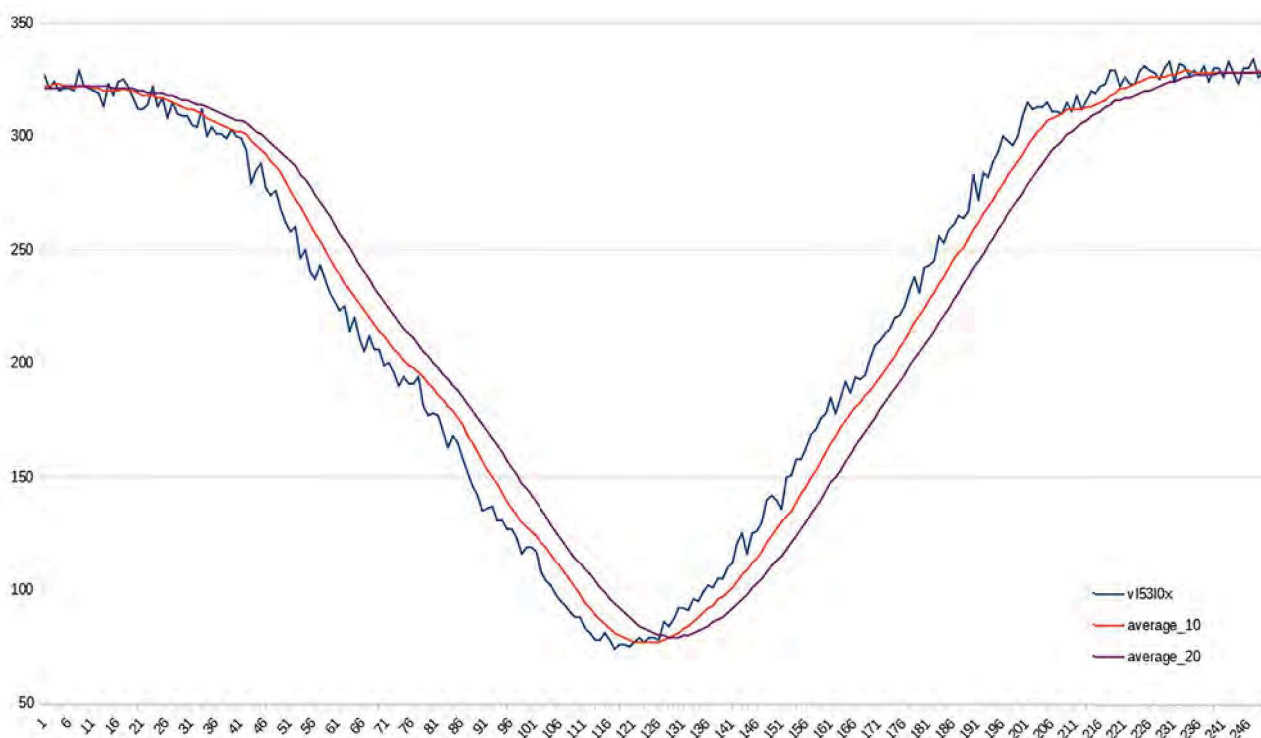


Рис. 3. Применение скользящего среднего с окном 10 и 20

скользящего среднего с окном в 10 и 20 отсчетов, и передавались во вне по последовательному интерфейсу. Вся дальнейшая обработка делалась на десктопном компьютере.

На рисунке 3 показаны результаты эксперимента, где синяя кривая — зашумлённый сигнал с датчика VL53L01, красный — сигнал после обработки алгоритмом скользящего среднего с размером окна усреднения 10, фиолетовый — скользящее среднее с окном 20. При увеличении размера окна усреднения качество восстановления сигнала повышается, но и появляется отставание выходного сигнала по фазе от входного сигнала. Опыт показал, что оптимальным окном для обработки данных с датчика VL53L01 является окно в диапазоне 5–10 отсчетов.

**Алгоритм упрощённого фильтра Калмана**

Фильтр Калмана использует прогноз с последующей коррекцией для определения состояний фильтра. Это иногда называют предсказателем-корректором или предсказанием-обновлением [5]. Основная идея состоит в том, что, используя информацию о динамике состояния, фильтр будет проецировать вперед и прогнозировать, каким будет следующее состояние.

За основу алгоритма взята идея упрощённого фильтра Калмана, расчётная формула которого приведена ниже:

$$x_{k+1}^{opt} = (1 - K) \cdot x_k^{opt} + K \cdot z_{k+1} \quad (2)$$

где,  $x_{k+1}^{opt}$  — отфильтрованное значение датчика

$k$  на предыдущем шаге;  $x_k^{opt}$  текущее показание датчика;  $K$  весовой коэффициент Калмана;  $z_{k+1}$  текущее значение параметра;

Известно, что на  $k$ -ом шаге есть значение, которое наилучшим образом приближает истинное значение параметра, а также показания датчика после фильтрации. В зависимости от точности датчика, ему придаётся вес  $K$ , а на показания предшествующих итераций передается вес  $(1-K)$ . Поэтому, чтобы найти оптимальное приближение к истинному значению параметра, приходящего с датчика, необходимо опытным путем подобрать коэффициент фильтра Калмана.

Необходимо отметить, что при уменьшении коэффициента Калмана, точность восстановления сигнала повышается, однако, вместе с этим увеличивается задержка реакции восстановленного сигнала по отношению к оригинальному [6]. Поскольку, в данном случае приоритет точности восстановления реального расстояния до объекта выше, чем отставание восстановленного сигнала от оригинала, можно сказать, что результаты получились лучше, чем при использовании скользящего среднего.

Как показали результаты проведенных экспериментов, фильтр Калмана дает меньшее значение среднеквадратичного отклонения, чем алгоритм скользящего среднего. Однако фильтр скользящего среднего менее чувствителен к изменению дисперсии наблюдаемого сигнала. Кроме того, проведенные исследования показали эффективность оператора скользящего среднего при фильтрации аддитивно-мультиплика-

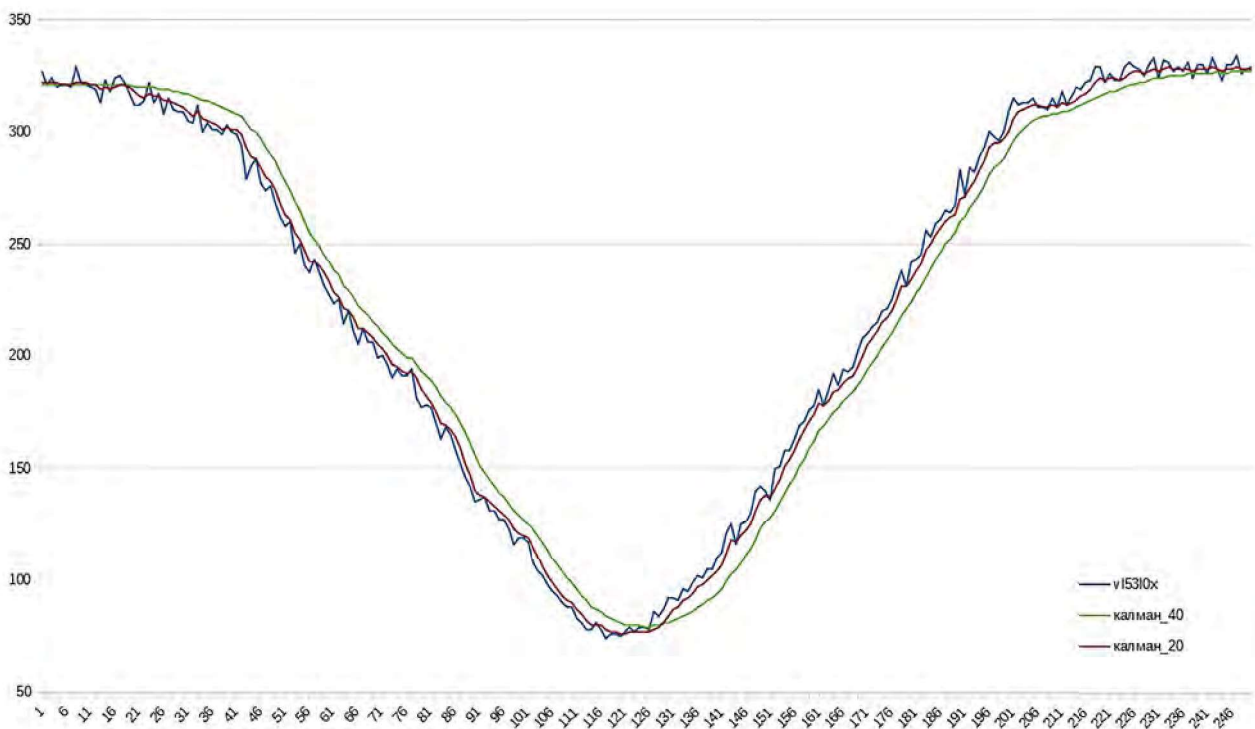
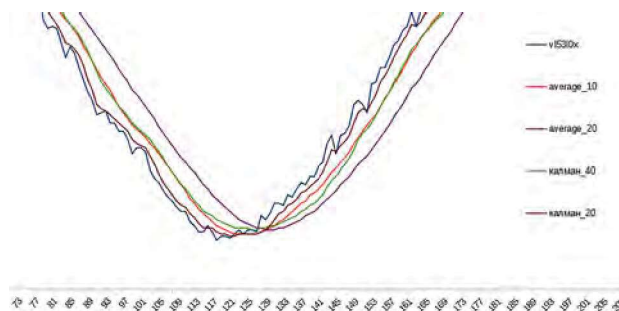


Рис. 4. Применение упрощенного фильтра Калмана



тивных процессов. Следует также отметить, что алгоритм его реализации более простой, чем для фильтра Калмана. Основным недостатком фильтрации на основе скользящего среднего является отставание выходного сигнала от входного, что хорошо видно на рисунке 3. В свою очередь фильтр Калмана обеспечивает меньшую задержку выходного сигнала и может применяться в системах, где важна динамика поведения системы.

Для оценки результатов и сравнения фильтров на рисунке 5 представлен фрагмент графика рассмотренных в данной статье алгоритмов фильтрации. Как видно из графиков рисунка 5, алгоритм скользящего среднего менее точно восстанавливает исходный сигнал, в отличие от алгоритма упрощенного фильтра Калмана. Следовательно, использование фильтра Калмана предпочтительнее для решения поставленной задачи фильтрации данных, получаемых от датчика VL53L0 в динамических системах.

#### Библиографический список

1. VL53L0X World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor (Datasheet – production data) – Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>
2. **Панфилов П.В.** Модуль для быстрого прототипирования управления мехатронным устройством // Вестник МГТУ Станкин 2022. № 1 (60). С. 53–58
3. **Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А.** Математические методы построения прогнозов. — М.: Радио и связь, 1997. — 112 с.
4. **Браммер К., Зиффлинг Г.** Фильтр Калмана Бьюси/ Пер. с нем. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1982. — 200 с.
5. **Kalman R.E.** A New Approach to Linear Filtering and Prediction // Transaction ASME Journal of Basic Engineering — 1960 — N 86 — pp. 35–45
6. **Rhudy M., Salguero R., Holappa K.** A KALMAN FILTERING TUTORIAL FOR UNDERGRADUATE STUDENTS // International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES), 2017, Vol. 8, No. 1, P. 1–18.



**Панфилов Павел Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*panfilov@micron.ru*

**Морозов Валерий Витальевич** – магистрант ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*val131518sm@gmail.com*

**Panfilov Pavel Vladimirovich** – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department  
of «Robotics and Mechatronics» of MSUT «STANKIN»

*panfilov@micron.ru*

**Morozov Valery Vitalyevich** – master student of MSUT «STANKIN»

*val131518sm@gmail.com*

---

---

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

---

УДК 004.942

М.Б. Бровкова, В.В. Бушуев, В.В. Молодцов  
M.B. Brovkova, V.V. Bushuev, V.V. Molodtsov

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, СПЕЦИФИКА РЕАЛИЗАЦИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

## DIGITAL TWINS OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS: STATE OF THE ART REVIEW, SPECIFICS OF IMPLEMENTATION AND USE, PROSPECTS

*Цифровой двойник – инновационная концепция, становящаяся все более актуальной с развитием четвертой промышленной революции и переходом к интеллектуальному производству. В статье представлен обзор работ в области цифровых двойников, рассмотрены специфические особенности применения концепции в производстве, проанализированы основные проблемы, связанные с ее практической реализацией, и возможные пути их решения. Основное внимание в работе обращено на особенности формирования мультифизических моделей, специфике работы с большими массивами разнородных данных для цифровых двойников и требованиям к кибер-физическим технологическим системам, являющимися их прототипами.*

*The paper presents the main approaches to digital twin formation taking into account many years of research. A concept for the creation of digital twins is proposed, with regard to the evolution of the current state of the object. A digital twin is an innovative concept that is becoming increasingly relevant with the development of the fourth industrial revolution and the transition to intelligent manufacturing. The paper provides an analysis of works in the field of digital twins, considers specific features of the concept application in manufacturing, analyzes the main problems associated with its practical implementation and their possible solutions. The work places particular emphasis on the features of the multiphysics model formation, the specifics of working with large arrays of heterogeneous data for digital twins and the requirements for cyber-physical technological systems that are their prototypes.*

**Ключевые слова:** цифровые двойники, кибер-физические системы (CPS), промышленный интернет вещей (IIoT), технологии больших данных и облачных вычислений, мультифизические математические модели.

**Keywords:** digital twins, cyber-physical systems (CPS), industrial Internet of things (IIoT), big data and cloud computing technologies, multiphysics mathematical models.

### **Введение (концепция цифровых двойников)**

Концепция цифровых двойников (Digital Twin), сформировавшаяся на рубеже веков, исходно была связана с работами, проводимыми NASA и аэрокосмической отраслью США [1, 2]. Впервые сформулированная в достаточно целостном виде М. Гривзом в 2002 г., в контексте интеграции средств для управления жизненным циклом изделия, она получила название, общепринятое в настоящее время, только в 2011 г. [3–5]. Первые работы, связанные с разработкой и использованием цифровых двойников для нужд

производственного сектора [6, 7], являлись всего лишь новым направлением уже достаточно сформировавшейся области исследований.

Естественно, что область формирования и начальная направленность концепции не могли не сказаться на определениях цифрового двойника. Так одно из наиболее популярных определений трактует цифровой близнец как ультра-реалистичную, интегрированную, мультифизическую, многомасштабную, вероятностную симуляцию реального объекта, использующую лучшие доступные физические

модели, постоянно обновляемую информацию от датчиков, накопленную информацию об аналогах и пр., чтобы отразить стадии жизненного цикла своего материального прототипа [2]. Сам М. Гривз представляет цифрового близнеца в виде набора виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциально или фактически произведенный продукт на всех уровнях, от атомарного до макроскопического [8].

Очевидно, что сама идея построения виртуальных объектов, достаточно полно соответствующих приведенным определениям, представляется мало реалистичной, как с точки зрения затрачиваемых ресурсов (материальных, временных и финансовых) на ее построение и поддержание в работоспособном состоянии, так и с точки зрения эффективного использования. Поэтому другие исследователи определили цифровых двойников как прорывную технологию, которая создает живую модель физического актива для профилактического обслуживания [9]. Эта модель будет постоянно адаптироваться к изменениям в окружающей среде за счет использования в реальном времени данных датчиков и сможет прогнозировать будущее прототипа.

Из упомянутых определений можно выделить свойства цифрового близнеца, отличающие его от традиционных имитационных моделей (см. рис. 1). В отличие от имитационных моделей, как правило, не привязанных к какому-либо конкретному физическому объекту, у каждого близнеца существует реальный прототип [10, 11]. Между ними поддерживается связь в реальном времени в течение всего жизненного цикла прототипа. Цифровой близнец способен накапливать, обрабатывать и сохранять информацию о своем прототипе для оценки состояния, прогнозирования специфики функционирования и симуляции его по-

ведения в разных ситуациях. Он является синергетической совокупностью разнородных имитационных моделей (мультифизической математической моделью), отражающей весь спектр эксплуатационных свойств прототипа с качественной и количественной точностью, необходимой для решения этих задач.

**Базовые технологии и состояние проблемы**

Идеологически концепция цифровых двойников является эволюционным скачком в моделировании, оформляющим его переход на новый качественный уровень. На ее основе начинают формироваться новые технологии моделирования и обработки информации, базисом для которых являются кибер-физические системы (CPS), промышленный интернет вещей (IIoT) и технологии больших данных и облачных вычислений [12, 13, 14].

Кибер-физические системы, являющиеся важнейшей частью этой триады, в концепции цифровых двойников играют две взаимосвязанные роли. С одной стороны, они являются теми самыми прототипами, эксплуатационные свойства и функционирование которых должны симулировать цифровые двойники, а с другой, основным источником информации необходимой для реализации двойников. Характерные атрибуты CPS и цифровых двойников представлены в табл. 1.

В формирующейся цифровой индустрии под CPS, понимается очередная ступень развития мехатронного технологического оборудования, характеризующаяся переходом к программно ориентированному подходу формирования систем управления, в то время как реализация традиционных мехатронных систем опирается в основном на аппаратно ориентированный подход [12, 15]. В результате часть конструкции машины, связанная с выполнением функций управления, реализуется в виртуальном пространстве.



Рис.1. Особенности цифрового двойника и его прототипа

Таблица 1. Сравнение характерных атрибутов CPS и цифровых двойников

Атрибут	Кибер-физическая система (реальный мир — виртуальное пространство)	Цифровой двойник (виртуальное пространство)
Базовые технологии	1. Мехатронные технологии 2. Компьютерное управление 3. Проектирование систем на основе моделей (MBSE) 4. CAD/CAM/CAE/PLM 5. Промышленный интернет вещей	1. Традиционные технологии моделирования предметных областей 2. Технологии больших данных и облачных вычислений 3. Технологии искусственного интеллекта 4. Интернет
Структура	1. Технологическая система 2. Умные датчики 3. Информационная сеть 4. Распределенное управление	1. Мультифизическая математическая модель прототипа 2. Базы данных и знаний 3. Аналитический аппарат
Решаемые задачи	1. Производство продукции 2. Переналадка и адаптация 3. Сбор буферизация и первичная обработка данных	1. Мониторинг технологического процесса и диагностика системы 2. Хранение данных и извлечение информации 3. Анализ информации и получение знаний 4. Управление и оптимизация производства 5. Прогнозирование состояния системы
Этапы жизненного цикла	1. Проектирование 2. Изготовление 3. Запуск и испытания 4. Эксплуатация и ремонт 5. Модернизация или утилизация	1. Анализ 2. Моделирование 3. Идентификация и верификация 4. Эксплуатация, валидация и модернизация 5. Архивирование или удаление

Благодаря наличию виртуальных компонентов, на этапе настройки и ввода оборудования в эксплуатацию возникает возможность реконфигурировать систему управления таким образом, чтобы эксплуатационные свойства оборудования наилучшим образом соответствовали характеру технологических задач, для решения которых оно было предназначено. За счет изменения структуры системы управления и настройки параметров, входящих в нее устройств, можно в определенной степени даже скомпенсировать ошибки, сделанные на этапе конструирования.

Насыщенные датчиками и диагностическими системами конструкции современных технологических машин генерируют огромные объемы информации об их состоянии и особенностях функционирования при решении разнообразных производственных задач. Эта информация частично обрабатывается в режиме реального времени в их достаточно мощных устройствах управления и используется для решения оперативных задач, а затем стирается и замещается новыми объемами данных. Данная информация, в случае ее сохранения и соответствующей обработки, может быть использована для решения разнообразных задач, включая: — диагностику и прогнозирование состояния оборудования; — настройку программ, управляющих конкретными технологическими процессами, под особенности конкретной технологической машины; — проектирование новых технологических машин

и т. д. Промышленный интернет вещей и технологии больших данных и облачных вычислений предоставляют практически неограниченные возможности по передаче, сохранению и обработке этой информации вне кибер-физической системы.

В настоящее время завершается переход от стадии формирования концепции цифровых двойников к стадии их практической реализации и внедрения в экономику [16, 17]. Для нее характерны проблемы, связанные с отсутствием полноценных средств интеграции в единую виртуальную сущность разнообразных моделей, имитирующих разнородные процессы, которые параллельно протекают в прототипе, между собой и данными, получаемыми как от самого прототипа, так и извне. В этой связи перед разработчиком цифровых двойников встает комплекс задач, среди которых наиболее важными являются следующие четыре:

1. Как организовать эффективное взаимодействие используемых для построения цифрового двойника моделей между собой и данными, получаемыми от прототипа и иных внешних источников?
2. Как обрабатывать и хранить уже накопленные и вновь поступающие большие объемы данных, извлекать из них полезную информацию и синтезировать на ее основе новые знания?
3. Как организовать эффективную взаимосвязь и обмен информацией между цифровым двойником

и его прототипом, обеспечивающую качественно-новый уровень управления на протяжении всего жизненного цикла последнего?

4. Как обеспечить окупаемость затрат на разработку и внедрение информационных технологий, реализующих концепцию цифровых двойников, и сделать их применение экономически оправданным.

Рассмотрим каждую из этих задач подробнее.

#### **Инновации в моделировании**

Функционирование любой достаточно сложной, современной производственной системы, сопровождается большим количеством процессов различной физической природы, движением материальных и информационных потоков. Моделированием этих процессов и потоков занимаются специалисты из разных областей знаний. Например, моделированием и совершенствованием конструкции мехатронного технологического оборудования занимаются инженеры механики, электромеханики и программисты. Иногда они вынуждены привлекать специалистов по электронике и метрологии. Моделированием транспортных потоков в современном автоматизированном производстве занимаются технологи и специалисты по логистике. Для решения своих задач они применяют специализированные физические, информационные и экономические модели, использующие аппарат из разных областей математики. Сами инструменты моделирования представляют собой разнородное программное обеспечение, обмен информацией между которым в большинстве случаев возможен только в асинхронном режиме, через промежуточные форматы данных [11, 16, 17, 18].

В такой ситуации опыт удачного применения цифровых двойников связан в основном с достаточно простыми материальными объектами [13, 19], а описания интегрированных цифровых моделей, разработанных для сложных систем, свидетельствуют о том, что их отнесение к цифровым двойникам достаточно условно [11]. Очевидно, что без серьезных изменений в методологии и практике моделирования, и самой структуре программных инструментов, идея создания виртуальных объектов подобных цифровым двойникам сложных производственных систем, хотя и представляется возможной, не является экономически целесообразной.

Подход к решению проблемы видится в применении модульного принципа построения цифрового двойника, в рамках которого модели, предназначенные для решения частных задач, оформляются в виде отдельных блоков — модулей, взаимодействующих по открытому протоколу. Инструментальные средства для создания таких блоков предоставляют различные независимые производители, специализирующиеся на создании частных моделей, описывающих разные аспекты функционирования прототипа или занимающиеся обработкой данных для цифрового близнеца [20, 21, 22].

Для реализации подключения и взаимодействия этих модулей необходима специализированная облачная платформа, выполняющая роль операционной среды, а при необходимости и функции системы реального времени. В задачи платформы будут также входить:

- обеспечение двойнику и образующим его специализированным модулям доступа к накопленным данным;

- обмен информацией с прототипом и другими двойниками, которые образуют цифровую модель высшего уровня, как в режиме реального времени, так и в интерактивном режиме;

- обеспечение эргономичного интерфейса для реализации полноценного взаимодействия цифрового двойника с его оператором [23, 24].

Для разработки открытого протокола и создания облачной платформы необходимы: организующая, финансовая и регуляторная поддержка на государственном уровне и участие международных финансовых, научных и общественно-политических объединений. Подобные программы существуют в ведущих промышленных странах и межгосударственных объединениях, таких как США, Евросоюз, Китай, Япония и пр. [13].

#### **Специфика работы с данными**

Во время функционирования производственной системы образуются значительные объемы данных (информация от различных датчиков, результаты измерений и моделирования, коды управляющих программ и пр.). В них заключена ценная информация о состоянии системы и особенностях процессов, протекающих в ней. В большинстве случаев собранные данные не могут быть использованы для анализа и принятия управленческих решений непосредственно, так как они разнообразны по своему содержанию, неоднородны по структуре, не всегда синхронизированы во времени и представлены в непригодной для человеческого восприятия форме больших массивов числовых данных [25].

Процесс обработки данных условно можно разделить на следующие стадии: сбор данных, их первичная обработка (группировка, сортировка, упаковка и пр.), хранение данных, анализ данных и извлечение из них полезной информации (mining), анализ собранной информации и получение знаний [14, 26].

Данные собираются эпизодически, по мере возникновения необходимости, для решения каких-либо практических или исследовательских задач и удаляются, когда она исчезает. Традиционно, обработкой и анализом данных занимаются специалисты из разных предметных областей. Хотя они располагают достаточно эффективными специализированными инструментальными средствами сбора, первичной обработки и анализа данных для своих областей, тем не менее, извлечение полезной информации остается до сих пор достаточно сложно формализуемой задачей

[10, 18, 27]. Проблема формализации процесса получения новых знаний, относящаяся к области исследований, связанных с искусственным интеллектом, в настоящее время не решена, и вопрос: «Будет ли она решена в обозримом будущем?» остается открытым.

В рамках реализации концепции цифрового двойника придется полностью поменять сложившуюся парадигму обработки данных. Данные будут собираться и обрабатываться перманентно, а информация в той или иной форме должна храниться в течение всего жизненного цикла прототипа, который может продолжаться годы, а в некоторых случаях и десятилетия. Учитывая, что для успешного функционирования цифрового двойника крупного производства могут потребоваться информационные потоки, существенно превосходящие объемами и плотностью, те, которые генерируются современным технологическим оборудованием, проблема передачи и хранения этих данных будет стоять исключительно остро, несмотря на использование самых современных интернет-протоколов и технологий больших данных [28, 29, 30].

Для ее решения необходимо разработать универсальные алгоритмы, интерфейсы и протоколы, которые обеспечат структурирование, конвертирование, упаковку и кластеризацию данных, позволят резко сократить объемы передаваемой и хранимой информации, дадут возможность восстанавливать конвертированные и упакованные данные без утраты исходных взаимосвязей между ними.

#### **Эволюция кибер-физических систем**

Даже при наличии всей перечисленной выше внешней инфраструктуры невозможно организовать полноценное взаимодействие между цифровым двойником и его прототипом при отсутствии соответствующих аппаратных и программных средств в структуре и системе управления последнего.

К таким аппаратными средствами в первую очередь относятся разнообразные устройства измерения и сбора данных, интегрируемые в структуру производства и конструкцию его технологического оборудования. Именно они являются первичным источником данных необходимых для разработки и регулярной верификации цифрового двойника. Дублирование и использование различных систем измерения улучшает качество данных, позволяет строить более достоверные эмпирические модели. Верификация результатов математического моделирования с помощью информации от датчиков улучшает надежность прогнозирования, позволяет осуществить параметрическую, а иногда и структурную идентификацию моделей. Поэтому в структуре производственной системы должны присутствовать все устройства измерения и сбора данных необходимые для обеспечения данными нормального функционирования цифрового двойника [31, 32].

Во-вторых, в структуре (конструкции) прототипа должны присутствовать элементы, обеспечивающие

его настройку, стабилизацию и адаптацию в соответствии с управленческими решениями, формируемыми с помощью цифровых двойников. Бесполезны решения, если возможности для их реализации отсутствуют. В качестве примера представим себе достаточно типичную ситуацию, когда для выполнения производственной программы необходимо существенно интенсифицировать режимы обработки на одном или нескольких станках производственного участка. В результате мощность резания, затрачиваемая приводами одного из них, возрастает выше некоторого критического уровня. Из-за увеличившихся через некоторое время температурных деформаций погрешность обработки деталей выходит за границы полей допусков. Участок начинает выпускать брак. В случае наличия на этом станке системы температурной стабилизации, способной обеспечить в этот период более интенсивный отвод тепла, такой сценарий был бы исключен.

В-третьих, цифровые производственные системы разного уровня должны разрабатываться на основе модульного принципа проектирования с максимальной унификацией блоков своей структуры и их присоединительных интерфейсов. Учитывая иерархичность структуры сложной производственной системы, такой подход не только обеспечит повышение качества и надежности прототипа, снижение затрат на его производство и эксплуатацию, но и предоставит возможности для переноса проблем, связанных с разработкой цифровых близнецов его элементов, на их производителя. В идеале, цифровые близнецы технологического оборудования должны поставаться вместе с ним, также, как и цифровые близнецы мехатронных подсистем и модулей этого оборудования.

В-четвертых, производственная система должна располагать мощной внутренней информационной сетью, построенной на основе интернета вещей. Такой подход обеспечит открытость и прозрачность системы, и возможность непосредственного контроля производителями оборудования и комплектующих жизненных циклов своих изделий, входящих в ее структуру. Это в свою очередь разгрузит оператора производства от работ по диагностике и профилактическому обследованию эксплуатируемого им оборудования, и в перспективе может привести к революционным изменениям в организации всего комплекса мероприятий, связанных с обслуживанием и ремонтом оборудования.

В-пятых, система управления цифровым производством должна быть максимально децентрализованной и иметь необходимую степень дублирования, так как при едином центре управления его отказ приводит к полной остановке производства, а если параллельно реализуется непрерывный обмен данными с цифровым двойником, многократно возрастают риски утраты ценной информации. В идеале система должна представлять развитую сеть равноценных

узлов управления, отказ некоторой части которых не должен существенным образом влиять на выполнение производственной программы, сбор и обработку важных для функционирования производства данных.

**Формирование экосистемы, экономические и иные аспекты**

Новые технологии и инструменты моделирования, сбора, передачи, обработки и хранения данных, стремительное развитие кибер-физических систем создают комфортную среду – «экосистему» для реализации и развития концепции цифровых близнецов. Для формирования этой экосистемы необходимы благоприятные экономические условия. Их создают

государственные структуры и крупные корпорации, которые являются основными выгодоприобретателями от внедрения технологий «цифрового производства». Они располагают большим набором инструментов для стимулирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в заданном направлении от прямых инвестиций до налоговых преференций и формирования благоприятной рыночной конъюнктуры. Крупные корпорации являются не только потребителями продуктов и технологий, связанных с цифровыми близнецами. Они активно участвуют в разработке и продвижении на рынок своих продуктов, реализующих элементы экосистемы цифровых двойников (см. табл. 2).

Таблица 2. Продукты крупных корпораций, реализующие элементы экосистемы цифровых двойников

Компания	Продукты	Описание
Dassault Systèmes	3DEXPERIENCE	Комплексная облачная платформа для поддержания полного цикла проектирования, разработки, производства, продаж, внедрения и сопровождения продукта [33].
Siemens AG (Siemens PLM Software)	Siemens PLM Software	Платформа для управления жизненным циклом изделия и управлению технологическими процессами. Позволяет проверять производственные процессы (Process Simulate), моделировать и анализировать многоуровневые системы (Simcenter Amesim), автоматизировать тестирование новых проектов (HEEDS), обрабатывать и анализировать данные получаемые посредством ИИТ (MindSphere) [34].
General Electric	Predix	Облачная платформа для ИИТ, для удовлетворения потребностей в сложном и быстром анализе больших данных в промышленности при условии соблюдения всех требований кибербезопасности [35].
Ansys, Inc.	ANSYS Twin Builder	Продукт для создания и управления цифровыми двойниками, позволяющий осуществлять полный цикл работы с цифровыми двойниками, а именно – планирование, создание, верификацию и валидацию, внедрение и отслеживание работы на протяжении всего жизненного цикла физического актива [36].
Oracle Corporation	Oracle Cloud	Служба облачных вычислений, предоставляющая через интернет серверы, хранилища, сети, приложения и сервисы через глобальную сеть центров обработки данных Oracle Corporation [37].
SAP SE	SAP Cloud Platform	Корпоративная облачная платформа, обеспечивающая доступ к большому количеству готовых сервисов, бизнес-приложений, баз данных, использованию машинного обучения, больших данных, интернета вещей и пр. [38].
Mathworks	Matlab (Simulink)	Набор инструментов для создания, проверки и оптимизации моделей цифровых двойников [22].
Bosch	Bosch IoT Suite	Включает в себя массив облачных услуг и пакетов программного обеспечения для типичных требований проектов ИИТ [39].
Microsoft	Azure Digital Twins	Платформа Интернета вещей, которая позволяет создавать комплексные цифровые модели сред [40].

В свою очередь, роль государственных структур не сводится исключительно к экономической составляющей. На их плечи будут ложиться задачи по формированию законодательной базы применения цифровых двойников, разрешению правовых проблем и коллизий, связанных с конфиденциальностью информации, которую очень непросто обеспечить в открытых системах, и правами на интеллектуальную собственность. Например, вопрос о том, кому принадлежат данные, полученные цифровыми двойниками [10]. Открытым остается вопрос о социальных последствиях внедрения технологий цифровых двойников, связанных с глобальным высвобождением персонала из производства по всему миру.

### Заключение

Представленный вашему вниманию анализ работ в области цифровых двойников, собранных из открытых источников, позволяет сделать заключение о большом интересе к этому направлению исследований специалистов из разных сфер человеческой деятельности. Цифровой двойник — это новая, динамично развивающаяся информационная концепция, претендующая на роль парадигмы развития «цифрового производства». Реализация концепции уже на данном этапе требует перехода на междисциплинарный уровень для интеграции технологий, методов и моделей из широкого спектра областей науки и техники. Создание технологий, формирующих экосистему цифровых близнецов, является глобальной задачей всеобъемлющее, полноценное решение которой возможно только на международном и межгосударственном уровне.

Основой для поиска и реализации новых решений стали информационные технологии, заключающиеся в широком применении промышленного интернета вещей, больших данных, облачных вычислений и кибер-физических систем. Их использование формирует условия для получения принципиально новых результатов. Главной отличительной особенностью концепции цифровых двойников является необходимость обеспечения согласованного взаимодействия технологий, перечисленных выше, что, с одной стороны, обуславливает получение нового качества, а с другой — создает трудности при разработке, поскольку необходимо взаимодействие специалистов различного профиля.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00299).*

### Библиографический список

1. **R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, K.D. Bettenhausen**, About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing, IFAC-PapersOnLine, Elsevier Ltd., pp. 567–572, 2015.
2. **E.H. Glaessgen, D.S. Stargel**, The Digital Twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In 53rd Struct. Dyn. Mater. Conf. Special Session: Digital Twin, Honolulu, US, pp. 1–14, 2012.
3. **M.W. Grieves**, Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises, International Journal of Product Development, 2 (1–2), pp. 71–84, 2005.
4. **M.W. Grieves**, “Product Specification Management (PSM): Enabling Manufacturing Quality Whitepaper by Dr. Michael Grieves,” 2008.
5. **M.W. Grieves**, Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management, Space Coast Press, 2011.
6. **G.N. Schroeder, C. Steinmetz, C.E. Pereira, E.D. B.**, Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange, IFAC-PapersOnLine, Elsevier B.V., pp. 12–17, 2016.
7. **F. Tao, M. Zhang, J.F. Cheng, Q.L. Qi**. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop, Computer Integrated Manufacturing Systems, vol. 23, Iss. 1, pp. 1–9, 2017.
8. **M. Grieves, J. Vickers**, “Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems,” Springer International Publishing, 2016.
9. **E.J. Tuegel, A.R. Ingrassia, T.G. Eason, S.M. Spottswood**, Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin, International Journal of Aerospace Engineering, pp. 1–14, 2011.
10. **A.M. Madni, C.C. Madni, S.D. Lucero**, Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering, Systems, 7 (1), 7, 2019.
11. **M. Schluse, M. Priggemeyer, L. Atorf, J. Rossmann**, Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14 (4), pp. 1722–1731, 2018.
12. **R. Stark, S. Kind, S. Neumeyer**, Innovations in digital modeling for next generation manufacturing system design. CIRP Annals, 66 (1), pp. 169–172, 2017.
13. **H. Zhang, G. Zhang, Q. Yan**. Dynamic resource allocation optimization for digital twin-driven smart shopfloor, 2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), pp. 1–5, 2018.
14. **Y. Zheng, S. Yang, H. Cheng**, An application framework of digital twin and its case study, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 10, pp. 1141–1153, 2019.
15. **J. Lee, B. Bagheri, H-A Kao**, A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. Manufacturing Letters 3, pp. 18–23, 2015
16. **M.D. Maio et al.**, «Closed-Loop Systems Engineering (CLOSE): Integrating Experimentable Digital Twins with the Model-Driven Engineering Process.» 2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE), Rome, 2018, pp. 1–8, 2018
17. **Q. Min, Y. Lu, Z. Liu, C. Su, B. Wang**, Machine Learning based Digital Twin Framework for Production



Optimization in Petrochemical Industry, International Journal of Information Management, 49, pp. 502–519, 2019.

18. **Z. Liu, N. Meyendorf, N. Mrad**, The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. AIP Conference Proceedings 1949, 020023, 2018.

19. **K. Reifsnider, P. Majumdar**, Multiphysics Stimulated Simulation Digital Twin Methods for Fleet Management, 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, pp. 1578, 2013.

20. Intercax, “Syndeia”, <http://intercax.com/products/syndeia/>, accessed: 2016-05-22.

21. No Magic, “Cameo Systems Modeler”, <https://www.nomagic.com/products/cameo-systems-modeler>.

22. Mathworks, “Matlab”, <https://ch.mathworks.com/discovery/digital-twin>

23. **D. Šormaz, A. Sarkar**, SIMPM – Upper-level ontology for manufacturing process plan network generation, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 55, pp. 183–198, 2019

24. **M. Milosevic, D. Lukic, A. Antic, B. Lalic, M. Ficko, G. Simunovic**, e-CAPP: A distributed collaborative system for internet-based process planning, Journal of Manufacturing Systems, 42, pp. 210–223, 2017.

25. **F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, F. Sui**, Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94 (4), pp. 1–14, 2018.

26. **J. Li, F. Tao, Y. Cheng**, et al. Big data in product lifecycle management. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81, pp. 667–684, 2015

27. **X. Dong, E. Gabrilovich**, et al, Knowledge vault: A web-scale approach to probabilistic knowledge fusion, The 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, ACM, pp. 601–610, 2014

28. **Y. He, J. Guo, X. Zheng**, From Surveillance to Digital Twin: Challenges and Recent Advances of Signal Processing for Industrial Internet of Things. IEEE Signal Processing Magazine, 35 (5), pp. 120–129, 2018.

29. **J. Li, F. Tao, Y. Cheng, L. Zhao**, Big data in product lifecycle management. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81, pp. 667–684, 2015.

30. **Y. Cheng, K. Chen, H. Sun, Y. Zhang, F. Tao**, Data and knowledge mining with big data towards smart production. Journal of Industrial Information Integration, 9, pp. 1–13, 2018.

31. **A.M. Madni**, Expanding Stakeholder Participation in Upfront System Engineering Through Storytelling in Virtual Worlds. Systems Engineering, 18, pp. 16–27, 2014.

32. **M. Madni, M. Spraragen and C.C. Madni**, Exploring and assessing complex systems’ behavior through model-driven storytelling, 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pp. 1008–1013, 2014.

33. Dassault Systemes, “3DEXPERIENCE”, <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/3dexperience/>

34. Siemens, “Siemens PLM Software”, <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/>

35. General Electric, “Predix”, <https://www.ge.com/digital/iiot-platform>

36. ANSYS, “ANSYS Twin Builder”, <https://cae-expert.ru/product/ansys-twin-builder>

37. Oracle, “Oracle cloud”, <https://www.oracle.com/cloud/>

38. SAP SE, “SAP Cloud Platform”, <https://www.sap.com/cis/products/cloud-platform.html>

39. Bosch, Bosch IoT Suite, <https://www.bosch-iiot-suite.com/capabilities-bosch-iiot-suite/>

40. Microsoft, “Azure Digital Twins”, <https://azure.microsoft.com/ru-ru/services/digital-twins/>

**Бровкова Мария Борисовна** — д-р техн. наук, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН  
[bmbsar@mail.ru](mailto:bmbsar@mail.ru)

**Бушуев Виктор Валерьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры станков ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
[vtk.bsh@gmail.com](mailto:vtk.bsh@gmail.com)

**Молодцов Владимир Владимирович** — д-р техн. наук, зав. кафедрой станков ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
[v\\_molodtsov@mail.ru](mailto:v_molodtsov@mail.ru)

**Brovkova Marina Borisovna** — D.Sc. of Engineering, chief Researcher at Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences  
[bmbsar@mail.ru](mailto:bmbsar@mail.ru)

**Bushuev Viktor Valer'evich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of «Machine Tools» of MSUT «STANKIN»  
[vtk.bsh@gmail.com](mailto:vtk.bsh@gmail.com)

**Molodtsov Vladimir Vladimirovich** — D.Sc. of Engineering, head of the sub-department of «Machine Tools» of MSUT «STANKIN»  
[v\\_molodtsov@mail.ru](mailto:v_molodtsov@mail.ru)

## ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

## SEARCH FOR THE OPTIMAL TECHNOLOGICAL SOLUTION IN THE MANUFACTURE OF MACHINE PARTS

*Статья посвящена стратегиям поиска оптимального проектного решения, которые используются при проектировании эффективного технологического процесса. Показаны различные варианты таких стратегий, особенности их применения, а также какими они обладают достоинства и недостатки. В статье рассматривается возможность расширения диапазона вариантов при поиске проектного решения и повышения эффективности технологии посредством использования современных методов обработки в производстве. А также рассматриваются способы оценки полученных технологий на эффективность.*

*This article is devoted to the search strategies of optimal design solution, which are used to design the optimal technological process. Various options of such strategies, specifics of their using, as well as their pros and cons are shown. This article suggests the opportunity of expanding the range of options when looking for a design solution and increasing technological efficiency through using processing modern methods in production. In this article, we also describe the assessment methods of technological efficiency.*

**Ключевые слова:** эффективность технологических процессов, стратегии проектирования, альтернативные методы обработки, оценка эффективности, вектор показателей эффективности технологии.

**Keywords:** technological process efficiency, design strategies, alternative processing methods, efficiency assessment, technological efficiency vector.

Эффективность технологических процессов и маршрутов изготовления деталей машин является крайне важной задачей для производства. Практически любая современная машина состоит из множества деталей различного уровня сложности. Многие из них являются сложнопрофильными, а также изготавливаются различными способами из различных материалов. Поэтому поиск оптимального технологического решения при проектировании той или иной детали является актуальной проблемой по сей день.

Проектирование технологической документации обычно включает в себя взаимосвязанные этапы, на каждом из которых технологу приходится принимать множество ответственных решений, которые непосредственно влияют на эффективность и качество изготовления деталей. К таким решениям относятся:

- определение технологического маршрута;
- выбор методов обработки;
- выбор оборудования, на котором будет вестись обработка;
- определение формы и размеров заготовки;
- выбор технологических баз и т. д.

Все решения, принятые на этапе проектирования напрямую отражаются на скорости изготовления детали, ее качестве, эффективности ее производства, а также на экономике предприятия. Этапы проектирования представлены на рисунке 1.

На этапе проектирования технологии, технологу, руководствуясь исходными данными будущего изделия решает поставленную задачу используя определенную стратегию. Можно выделить 6 стратегий проектирования [3, с. 14–15]:

- Линейная стратегия;
- Циклическая стратегия;
- Разветвленная стратегия;
- Адаптивная стратегия;
- Стратегия приращений;
- Стратегия случайного поиска.

**Линейная стратегия** представляет собой последовательность, в которой каждое последующее принятое решение напрямую зависит от исхода предыдущего и не зависит от результатов последующих действий (рис. 2).

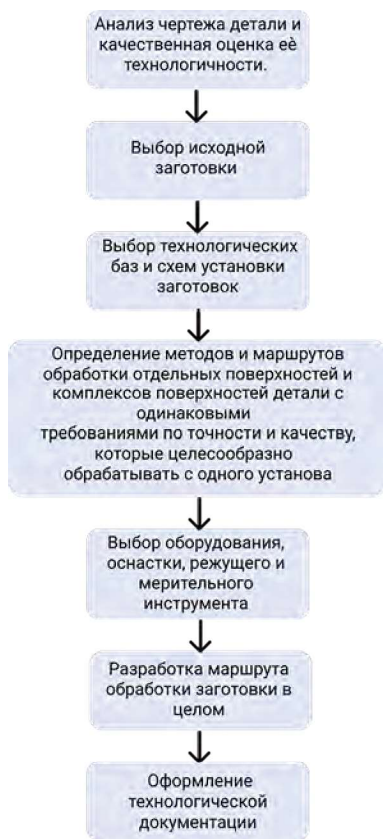


Рис. 1. Этапы проектирования технологической документации

**Циклическая стратегия** используется, когда на некотором этапе проектирования, после получения результатов требуется вернуться к одному из предыдущих этапов. Следовательно, в линейной цепи появляется петля или петли. Таким образом данная стратегия позволяет достигать поставленной задачи посредством постоянного улучшения принимаемых вариантов (рис. 3).

**Разветвленная стратегия** позволяет параллельно решать сразу несколько проектировочных задач, что позволяет существенно сократить время проектирования. Такую стратегию можно применять, когда при решении различных задач действия проектировщиков не зависят друг от друга. Также данная стратегия позволяет создавать альтернативные этапы, с помощью которых можно в определенной мере видоизменить свою стратегию, исходя из результатов полученных на предыдущих этапах (рис. 4).

**Адаптивная стратегия** отличается от остальных тем, что в ней отсутствуют элементы проверки правильности принятых решений и возврата на ранние этапы. С самого начала задается только первое действие, а каждое последующее действие зависит от результатов предшествующего. Достоинствами данной стратегии является наличие наиболее полной исходной информации на каждом этапе. Невозможность контролировать и предугадывать затраты на проект и сроки его выполнения являются недостатками данной стратегии. (рис. 5). Стоит отметить, что данная стратегия считается наиболее разумной.

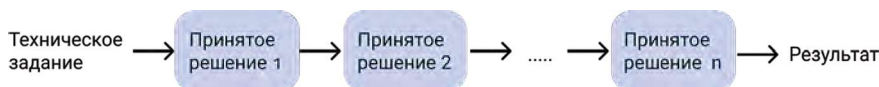


Рис. 2. Линейная стратегия проектирования

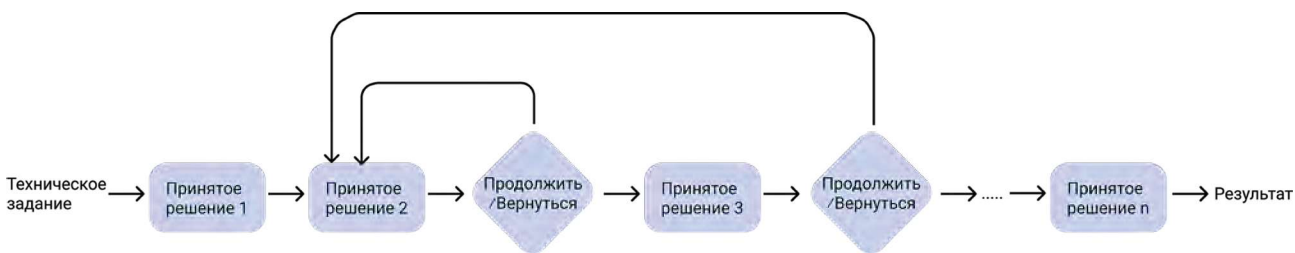


Рис. 3. Циклическая стратегия проектирования

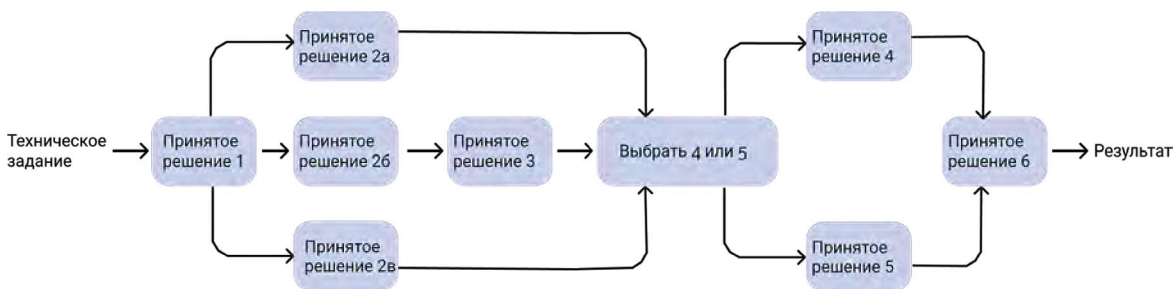


Рис. 4. Разветвленная стратегия проектирования

**Стратегия приращения** является достаточно надежным, но ограниченным вариантом **адаптивного поиска**. Отличием такой стратегии от других является достижение хорошего решения через постоянное изменение и совершенствование принятых. Полученное таким образом проектное решение анализируется, в нем находятся слабые стороны, затем недочеты устраняются, после чего все происходит заново. Следует отметить, что на основании стратегии приращения часто производится автоматическая оптимизация (по принципу нейросетей). Недостатком же ее является большой риск пропустить хорошее решение, если приращение слишком велико и не охватывает всего поля поиска (рис 6).

**Стратегия случайного поиска** отличается от остальных отсутствием какого-либо плана поиска решения. При выборе какой-либо стратегии не учитываются результаты последующих этапов. Это позволяет искать решения без каких-либо предубеждений. Такую стратегию имеет смысл использовать в новаторских проектах, когда не стоит сразу пренебрегать какими-либо решениями (рис 7).

Считаю необходимым отметить что почти все приведённые выше, стратегии поиска проектного решения поддаются автоматизации. Одним из примеров такой автоматизации является составление на их основе нейросетей, которые позволят искать оптимальные решения исходя из исходных данных.

Расширить количество возможных проектных решений возможно за счёт рассмотрения большего

спектра методов обработки материалов. То есть рассматривать не только классические, но и альтернативные методы обработки материалов.

На сегодняшний день в мире существует множество методов обработки материалов. Многие, из которых являются классическими (например, классическим методом обработки материала резанием является фрезерование) и повсеместно используются на машиностроительных предприятиях. Но такие методы не единственные, наряду с ними так же существуют и так называемые «экзотические» методы обработки. Например, это лазерная обработка, электро-лучевая обработка, фрикционная обработка, ультразвуковая обработка и т. д. Такие способы обработки материалов встречаются значительно реже, и они менее распространены, нежели классические.

Анализируя различные методы обработки, можно сделать вывод, что использование альтернативных наряду с классическими позволяет повысить эффективность технологии, сократить технологический маршрут, а также повысить безопасность труда. Для примера, на рисунке 8 приведены достоинства фрикционной обработки материалов, а именно фрикционного разрезания по отношению к резанию лезвийным инструментом.

Помимо повышения эффективности технологии, использование альтернативных методов обработки позволяет получить больше вариантов проектных решений поскольку рассматривается полный спектр вариантов обработки. Это особенно важно, когда речь



Рис. 5. Адаптивная стратегия проектирования



Рис. 6. Стратегия приращения

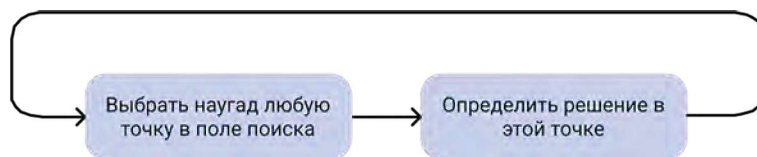


Рис. 7. Стратегия случайного поиска

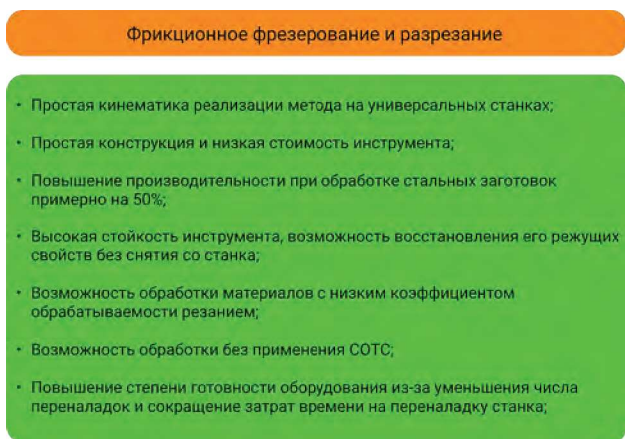


Рис. 8. Достоинства фрикционного разрезания по отношению к резанию лезвийным инструментом

идет о разработке технологии изготовления каких-либо принципиально новых деталей и использование традиционных методов обработки может быть не эффективно и не рентабельно. Общим недостатком таких нестандартных методов как правило является высокая стоимость оборудования. Но в долгосрочной перспективе использование таких методов обработки сокращает технологический маршрут и позволяет уменьшить себестоимость изготовления деталей.

После выбора стратегии проектирования, определения различных вариантов технологического маршрута и написания технологических процессов для каждого из них, встает вопрос определения эффективности самих технологий. То есть требуется выяснить какая технология самая эффективная из спроектированных.

Для оценки эффективность зачастую учитывают такие показатели как качество детали, себестоимость ее изготовления и время, которое необходимо затратить для ее изготовления. Иными словами, деталь, изготовленная по соответствующей технологии должна полностью соответствовать требованиям конструкторской документации, изготовление должно занимать как можно меньше времени, а также себестоимость должна быть минимальной. Но эти критерии далеко не единственные, которые можно учитывать при оценке эффективности технологии.

Существует метод оценки эффективности технологии, который называется **вектор показателей эффективности технологии**, который характеризуется уравнением (1) [2, с. 54].

$$e = e_a + e_b, \tag{1}$$

где

$$e_a = \langle e_1, e_2, \dots, e_l \rangle \quad e_b = \langle e_{l+1}, \dots, e_k \rangle$$

$e_a$  — вектор собственно технологических показателей;

$e_b$  — вектор показателей качества объекта технологического воздействия;

$e_j$  — единичный показатель качества технологии;  
 $k$  — общее число показателей качества технологии;

Данный метод позволяет оценить эффективность технологии с учетом следующих параметров:

- показатель быстродействия ( $e_1$ )
- показатель надежности ( $e_2$ )
- показатель материалоемкости ( $e_3$ )
- показатель энергопотребления ( $e_4$ )
- показатель затрат информационных ресурсов ( $e_5$ )
- показатель затрат времени ( $e_6$ )
- показатель удельных трудозатрат ( $e_7$ )
- показатель суммарных удельных трудозатрат ( $e_8$ )
- природоохранный показатель ( $e_9$ )
- показатель БЖД ( $e_{10}$ )
- эргономический показатель ( $e_{11}$ )
- показатель точности изготовления ( $e_{12}$ )
- показатель качества поверхностного слоя изделия ( $e_{13}$ )
- показатель качества объемных свойств изделия (твердость, пористость) ( $e_{14}$ )

Сущность метода заключается в построении так называемого вектора эффективности, который учитывает вышеперечисленные показатели. После получения вектора эффективности для каждого варианта технологического процесса необходимо сравнить получившиеся векторы и выбрать наиболее эффективный.

Достоинство такого метода оценки заключается в том, что появляется возможность определить ряд показателей, которые являются определяющими для изделия, и оценивать эффективность технологии опираясь на них. Также ряд показателей являются взаимосвязанными. Таким образом достижением одних показателей обеспечивается и выполнение других, связанных с ними.

### Библиографический список

1. Нестеренко В.П., Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х., Пашкова Л.А. Методика расчета оптимального варианта технологического процесса в машиностроении // International journal of experimental education.
2. Ю.А. Моргунов, Д.В. Панов, Б.П. Саушкин, С.Б. Саушкин. Научно-технические технологии машиностроительного производства, Москва: Форум, 2013 г. — 925 с.
3. Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, А.Ф. Прохоров и др. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении, Москва: Машиностроение, 1986 г. — с. 7–50.

***Седых Михаил Иванович*** – доцент кафедры технологии машиностроения  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*sedykhmi@mail.ru*

***Карташев Дмитрий Игоревич*** – инженер-технолог ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва»  
*pro100dimonn@gmail.com*

***Sedykh Mikhail Ivanovich*** – associate professor at the sub-department of «Mechanical engineering technology»  
of MSUT «STANKIN»  
*sedykhmi@mail.ru*

***Kartashev Dmitry Igorevich*** – manufacturing engineer RSC «Energia»  
*pro100dimonn@gmail.com*

---

---

# ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

---

УДК 621.777

Н.С. Толмачев, И.Ф. Анненков  
N.S. Tolmachev, I.F. Annenkov

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХСТАДИЙНОЙ СХЕМЫ ШТАМПОВКИ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

## RESEARCH OF TREE-STAGE EXTRUSION STAMPING SCHEME

*В работе рассмотрена трехстадийная схема штамповки выдавливанием. На основе применения комбинированной матрицы плана эксперимента, содержащей результаты компьютерного моделирования и физических экспериментов, построены математические модели для расчета энергии деформирования и длины стержня в конце первой стадии комбинированного выдавливания.*

*In this work, a three-stage extrusion stamping scheme is being considered. Based on the application of the combined matrix of the experimental design, containing the results of computer modeling and physical experiments, mathematical models were built to calculate the deformation energy and the length of the bar at the end of the first stage of combined extrusion.*

**Ключевые слова:** комбинированное выдавливание, моделирование процессов объемной штамповки.

**Keywords:** combined extrusion, modeling of processes of forming.

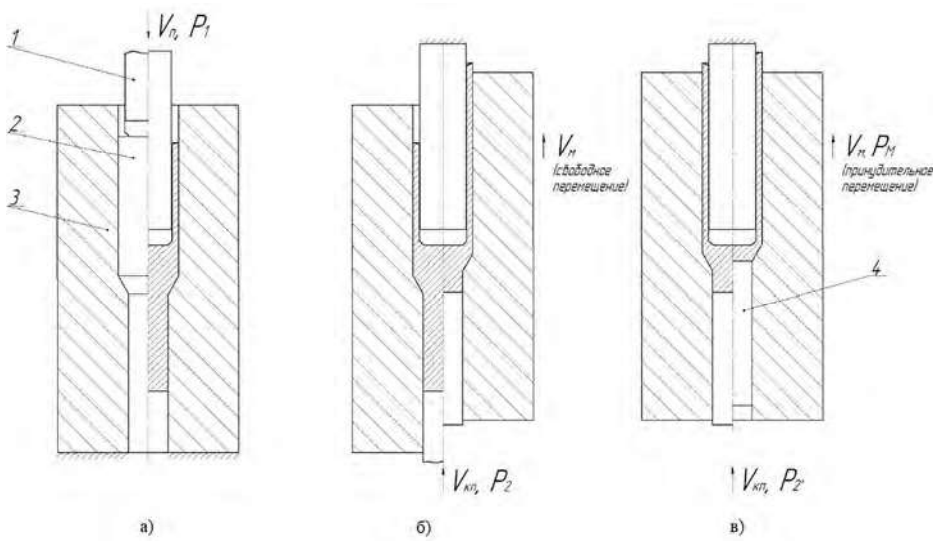
Известна трехстадийная схема штамповки за один переход поковки типа «стакан» (рисунок 1), содержащая операцию комбинированного выдавливания на 1 стадии. На 2 стадии производится закрытая прошивка и раздача стенки в плавающей матрице, на 3 стадии производится калибровка конической стенки и дна [4]. Целью работы является изучение кинематики течения материала на 1-й стадии комбинированного выдавливания, а также построение математических моделей для расчета энергии деформирования и длины стержня после данной стадии с помощью применения методов планирования факторного эксперимента.

Физические эксперименты проводятся на универсальной испытательной машине INSTRON 5989 – прессе простого действия. Для реализации предложенной схемы выдавливания в промышленных масштабах, необходима машина со сложной кинематикой с возможностью независимого перемещения матрицы, пуансона и контрпуансона. Теоретически было определено, что одновременное заполнение полостей стенки и стержня на стадии комбинированного выдавливания возможно при незначительном отличии сил прямого и обратного выдавливания, что

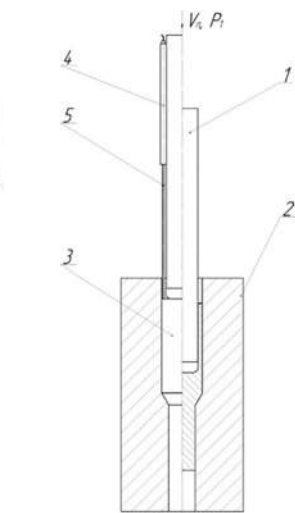
соответствует определенным соотношениям размеров инструментов  $D_M/D_0$  и  $D_M/D_{\Pi}$ , где  $D_{\Pi}$  – диаметр пуансона,  $D_M$  – диаметр ступенчатой матрицы,  $D_0$  – диаметр отверстия ступенчатой матрицы [1, 4]. В данной работе исследования проводятся для соотношений  $D_M/D_{\Pi}$  равных 1,27; 1,37; 1,5.

Отслеживание процесса заполнения полостей при комбинированном выдавливании стенки «стакана» и внешнего стержня проводится при помощи физического опыта и компьютерного моделирования. В физических опытах для отслеживания роста высоты стенки согласно представленной схеме (рисунок 2) собирается оснастка. Используется три комплекта пуансонов и вставок, размеры которых соответствуют приведенным ранее соотношениям  $D_M/D_{\Pi}$ . Материал заготовки – свинец С1, как материал, имитирующий поведение стали в горячем состоянии. Изменение высоты стенки фиксируется при помощи датчика перемещения. Изменение длины стержня рассчитывается исходя из закона постоянства объема заготовки.

Для компьютерного моделирования физических экспериментов используется программный комплекс DeFORM 3D. На основании моделирования строятся графики перемещения точек заготовки (рисунок 3).



**Рис. 1.** Схема трехстадийного выдавливания: а) — комбинированное выдавливание металла в стенку стакана и внешний стержень; б) — закрытая прошивка заготовки, совмещенная с раздачей стенки в плавающей матрице; в) — калибровка конической стенки и дна. 1— пуансон; 2 — заготовка; 3 — ступенчатая матрица; 4 — контрпуансон



**Рис. 2.** Схема установки датчика со щупом. 1— пуансон, 2 — ступенчатая матрица, 3 — заготовка, 4 — корпус датчика перемещения, прикрепленный к пуансону, 5 — щуп датчика перемещения

За нулевую координату  $z$  матрицы принимается точка начала расширения отверстия.

Анализ результатов экспериментов позволяет сделать вывод о течении материала в две полости на протяжении всей первой стадии выдавливания. Графики, полученные на основе физических и компьютерных опытов, отличаются незначительно. Таким образом, приведено экспериментальное доказательство наличия на первой стадии комбинированного выдавливания. На основании этого сделан промежуточный вывод о хорошей сходимости параметров при физическом эксперименте и компьютерном моделировании. Полученные результаты позволяют выполнить переход к планированию и реализации эксперимента. Матрица плана опыта выбирается в зависимости от числа и уровня варьирования факторов. Принимается следующая математическая модель, коэффициенты которой определяются в результате эксперимента:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

Факторы и уровни их варьирования указаны в таблице 1. План факторного эксперимента в кодах  $F_i$  и  $X_i$  представлен в таблице 2. Согласно матрице плана эксперимента проводится моделирование 9 опытов.

Задание основных параметров компьютерной модели основывается на предложенной схеме деформирования (рисунок 1). Эскиз трехмерной модели с обозначением варьлируемых факторов представлен на рисунке 4

Задаются следующие исходные данные моделирования: характеристика материала заготовки — пла-

стическая, температура материала заготовки  $20^\circ\text{C}$ , кривая упрочнения материала — экспериментально полученная в работе [4] кривая упрочнения для свинца С1, характеристика материала пуансона — упругая, температура инструментов  $20^\circ\text{C}$ , материал пуансона AISI — H-13, аналог стали 4X5MФ1С, характеристика материала матрицы — абсолютно жесткая, движение инструментов задано со скоростью 10 мм/мин, в качестве модели трения выбирается закон трения сдвига (Shear). Результаты компьютерного моделирования представлены в таблице 3. Согласно схеме процесса, на рисунке 1, значения силы  $F_{\max 1}$  и величина смещения торца пуансона  $\Delta_{\text{кон1}}$  приводятся для стадии а), значения силы  $F_{\max 2}$  — для стадий б). Для более наглядного вида выполнен переход к безразмерным величинам смещения — процентам величины смещения торца пуансона от величины начального эксцентриситета его установки.

Для оценки полученных данных, опыты № 2, № 3, № 4 и № 7 трижды дублируются при помощи физического эксперимента. Результаты дублирования представлены в таблице 4.

Анализ формоизменения заготовок показывает хорошую сходимость результатов компьютерного моделирования и физических опытов в большинстве случаев. Положительные величины смещений свидетельствуют о движении пуансона к оси матрицы. Таким образом, в опытах по комбинированному выдавливанию пуансон смещается к оси матрицы, т. е. наблюдается эффект самоцентрирования пуансона.

Для анализа энергетических показателей процесса комбинированного выдавливания в конце первой



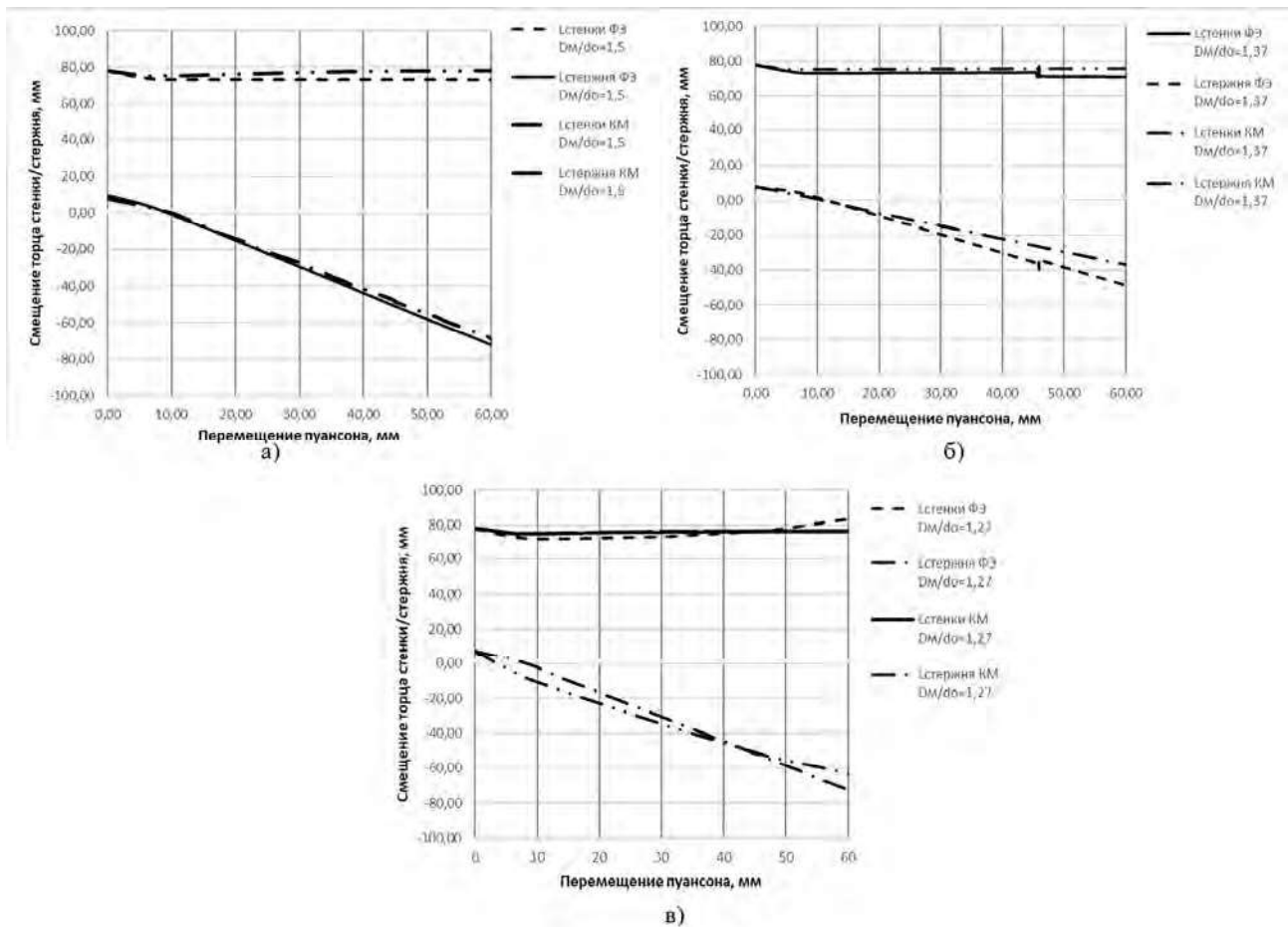


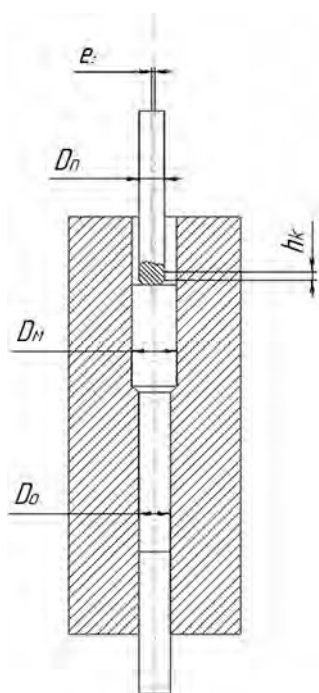
Рис. 3. Графики смещения верхнего и нижнего торцов заготовки относительно неподвижной матрицы. а) для соотношения  $D_M/D_П = 1,5$ ; б) для соотношения  $D_M/D_П = 1,37$ ; для соотношения  $D_M/D_П = 1,27$

Таблица 1. Факторы и уровни их варьирования

№	Фактор		$X_i$	$x_i$
1	$F_1$	Отношение диаметра матрицы к диаметру пуансона $D_M/D_П$	1,50	0
			1,37	1
			1,27	2
2	$F_2$	Отношение высоты калибрующего пояса пуансона к диаметру матрицы, $h_k/D_M$	0,1	0
			0,2	1
			0,3	2
3	$F_3$	Начальный эксцентриситет расположения оси пуансона относительно оси матрицы отнесенный к диаметру матрицы, $e_0/DM$	0	0
			0,013	1
			0,026	2
4	$F_4$	Качественный фактор SH: 0 – схема деформирования в неподвижной матрице 1 – схема деформирования в подвижной матрице	0	0
			1	1

Таблица 2. Матрица плана дробного факторного эксперимента  $3^{3*2}/9$  в кодах  $F_i$  и  $X_i$ 

№	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	0	0	0	0	1,5	0,1	0	0
2	1	0	1	0	1,37	0,1	0,013	0
3	2	0	2	1	1,27	0,1	0,026	1
4	0	1	1	1	1,5	0,2	0,013	1
5	1	1	2	0	1,37	0,2	0,026	0
6	2	1	0	0	1,27	0,2	0	0
7	0	2	2	0	1,5	0,3	0,026	0
8	1	2	0	1	1,37	0,3	0	1
9	2	2	1	0	1,27	0,3	0,013	0



**Рис. 4.** Оснастка в сборе с обозначением варьируемых факторов.  $D_{п}$  – диаметр пуансона;  $D_{м}$  – диаметр ступенчатой матрицы;  $D_{б}$  – диаметр отверстия ступенчатой матрицы;  $h_{к}$  – высота калибрующего пояса пуансона;  $e_0$  – начальный эксцентриситет расположения оси пуансона относительно оси матрицы

Таблица 3. Основные результаты компьютерного моделирования

№ оп.	$\Delta_{кон1}$ , мм	$\frac{\Delta_{кон1}}{e_0}$ , %	$F_{max1}$ , кН	$F_{max2}$ , кН	$L_{cr}$ , мм	$E_1 * 10^6$ , кДж
1	0,006	0,00%	29,9	46,2	57,4	2,27
2	0,155	31,00%	34,6	47,3	58,5	2,6
3	0,090	8,96%	48,1	45,1	48,8	2,97
4	0,041	8,10%	27,8	28,1	37,6	1,87
5	0,175	17,50%	34,9	45,1	79,7	2,6
6	0,001	0,00%	40,1	57,2	109,8	3,06
7	0,183	18,30%	30,8	44,1	58,8	2,31
8	0,001	0,00%	34,5	38,1	60,1	2,14
9	0,057	11,46%	40,2	58,2	111,8	3,08

Таблица 4. Основные результаты дублирования компьютерного моделирования физическими экспериментами

№ оп.	$F_{max1}$ , кН				$F_{max2}$ , кН				$L_{cr}$ , мм			
	КЭ	Д2	Д3	Д4	КЭ	Д2	Д3	Д4	КЭ	Д2	Д3	Д4
2	34,6	35,35	36,12	35,68	47,3	48,59	46,21	44,58	58,5	55	61	56
3	48,1	44,36	48,06	45,12	45,1	46,58	44,28	44,68	48,8	46	54	52
4	27,8	27,81	29,57	28,15	28,1	26,52	30,03	27,05	37,6	44	45	48
7	30,8	31,71	30,20	32,17	44,1	45,25	43,16	46,89	58,8	57	59	56

стадии штамповки по рассматриваемой схеме строятся уравнения регрессии для  $E_1$  на основании результатов компьютерного моделирования. В кодированном масштабе уравнение регрессии для  $E_1$  принимают соответствующий вид:

$$y = 2,544 - 0,038x_1 - 0,052x_2 + 0,068x_3 - 0,109x_4 + 0,00000039z_1 + 0,017z_2 + 0,014z_3 \quad (2)$$

После исключения незначимых коэффициентов и перевода в натуральный масштаб получаем уравнение

$$E_1 = 37,905 + 15,561 \frac{D_M^2}{D_{П,2}^2} - 46,958 \frac{D_M}{D_{П,2}} + 5,167 \frac{h_k^2}{D_M^2} - 2,581 \frac{h_k}{D_M} + 246,548 \frac{e_0^2}{D_M^2} - 1,154 \frac{e_0}{D_M} - 0,327SH \quad (3)$$

В результате анализа математической модели (3) подтверждается, что осесимметричная форма очага пластической деформации соответствует минимуму энергии деформирования. Из этого заключено, что наличие дополнительной степени свободы позволяет реализовать принцип минимума энергии деформирования, т. к. в этом случае происходит самоорганизация процесса течения материала. Помимо расчетов энергетических показателей производится построение математической модели определения длины внешнего стержня. Для расширения применимости полученных результатов в качестве численных значений используются относительные величины  $L_{ст}/D_M$ . Уравнение регрессии  $L_{ст}/D_M$ , построенное на основе компьютерного моделирования в кодированном масштабе, согласно приведенным коэффициентам, имеет вид

$$y = 1,803 - 0,042x_1 + 0,277x_2 - 0,171x_3 - 0,238x_4 + 0,000004z_1 - 0,103z_2 - 0,016z_3 \quad (4)$$

После исключения незначимых коэффициентов и перевода в натуральный масштаб имеем

$$\frac{L_{ст}}{D_M} = 8,844 - 1377,781 \frac{D_M}{D_{П,2}} - 16,709 \frac{h_k^2}{D_M^2} + 8,665 \frac{h_k}{D_M} + 14,046 \frac{e_0}{D_M} - 0,874SH \quad (5)$$

Полученная математическая модель (5) позволит прогнозировать течение металла на стадии комбинированного выдавливания.

### Библиографический список

1. Денишев Т.В. Совершенствование технологии штамповки поковок типа «стакан» методом комбинированного выдавливания: дис. канд. техн. наук: 05.02.09 / Денишев Тимофей Вячеславович. — М., 2012. — 133 с.
2. Дмитриев А.М. Технологияковки и объемной штамповки. Ч. 1. Объемная штамповка выдавливанием: Учебник для вузов / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов. — М.: Машиностроение, 2005. — 500 с.
3. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. — М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. — 304 с.
4. Толмачев Н.С. Снижение энергоемкости операции комбинированного выдавливания детали типа «стакан» на основе развития технологии и разработки специализированного прессы: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Толмачев Никита Сергеевич — М., 2017 — 160 с.

**Анненков Иван Федорович** — магистрант ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
annenkov.99@mail.ru

**Толмачев Никита Сергеевич** — канд. техн. наук, зав. лабораторией технологий пластического деформирования материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
management1317@gmail.com

**Annenkov Ivan Fedorovich** — master student of MSUT «STANKIN»  
annenkov.99@mail.ru

**Tolmachev Nikita Sergeevich** — candidate Sc. of Engineering, head of the laboratory of «Plastic Deformation of Materials» of MSUT «STANKIN»  
management1317@gmail.com