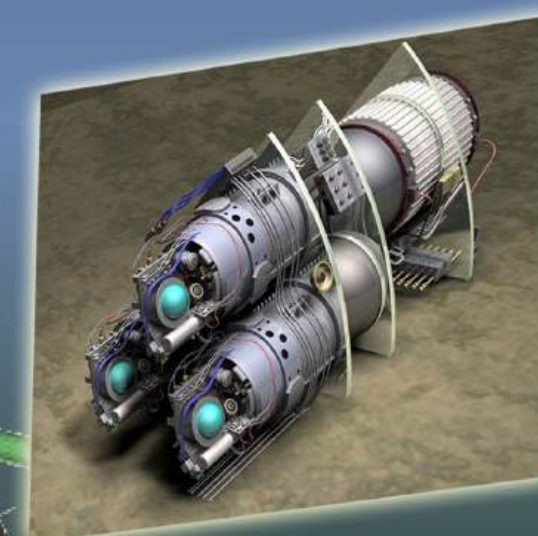
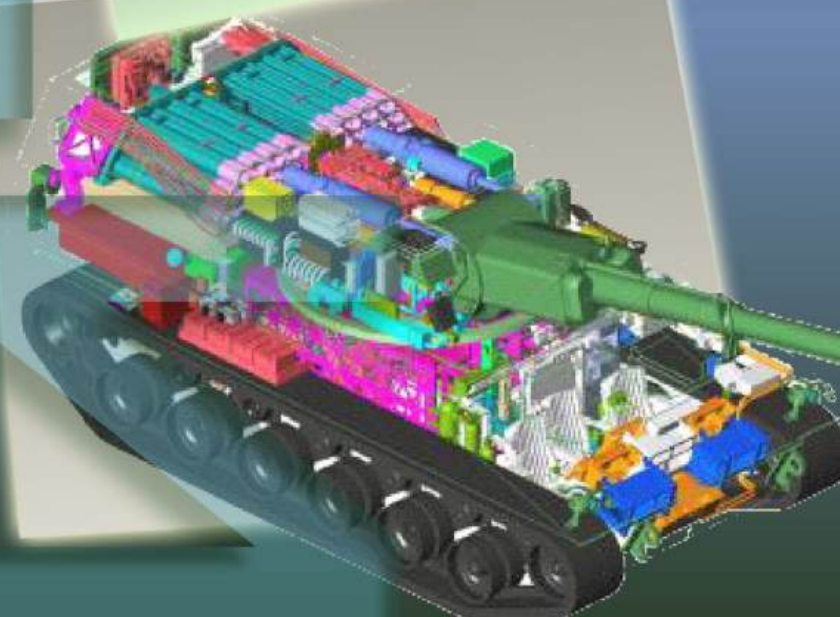
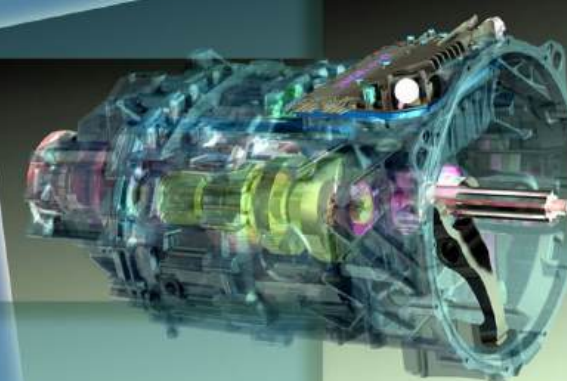
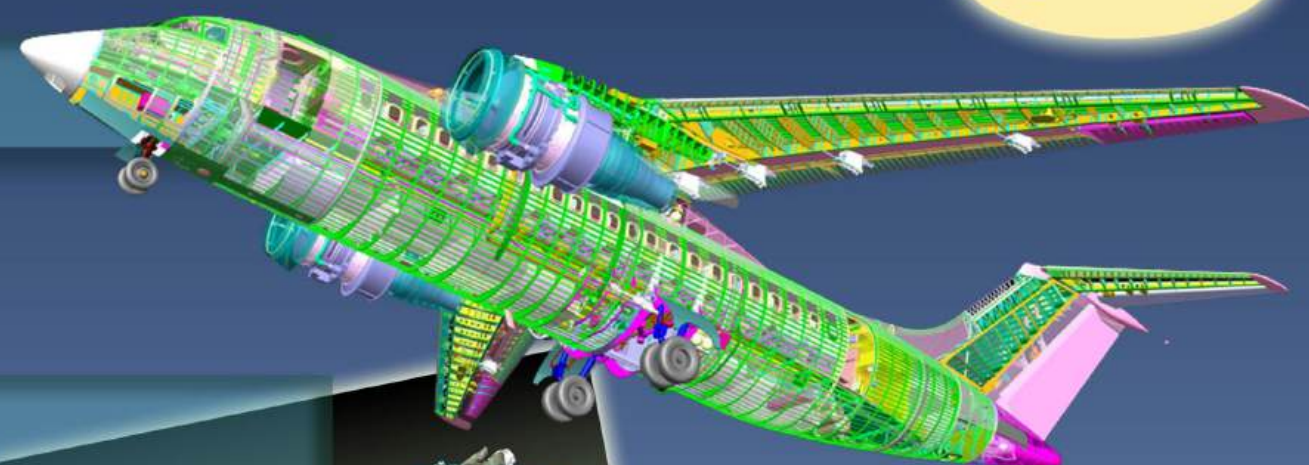


Индекс 79378

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 4' 2023





## Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79379**  
**Издается с 1984 года**



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Конструкции из композиционных материалов**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80089**  
**Издается с 1981 года**



Научно-технический журнал  
**Информационные технологии в проектировании и производстве**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79378**  
**Издается с 1976 года**



Межотраслевой научно-практический журнал  
**Экология промышленного производства**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80090**  
**Издается с 1993 года**



Научно-практический журнал  
**Вопросы защиты информации**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79187**  
**Издается с 1974 года**

Все издания ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);  
факс: 8 (495) 491-44-80.  
E-mail: [izdanie@ntckompas.ru](mailto:izdanie@ntckompas.ru)



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА  
«КОМПАС»

## № 4 (192) 2023

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1976 г.

### Главный редактор

И. А. Шеремет, акад. РАН, проф., заместитель директора по науке РЦНИ

### Заместитель главного редактора

В. Н. Гридин, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ЦИТП РАН

### Ответственный секретарь

Э. Ю. Есипова, канд. техн. наук, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

### Редакционная коллегия:

В. В. Бордюже, д-р техн. наук, проф., Координационный совет по информационным технологиям предприятий ОПК РФ; А. И. Громов, канд. хим. наук, НИУ «Высшая школа экономики»; В. В. Кондратьев, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева; Ю. Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф., МИЭМ НИУ ВШЭ; С. А. Матвеев, канд. техн. наук, ФГУП «ЦНИИмаш»; Е. И. Митрушкин, д-р техн. наук, проф., АО «НИИАА»; С. В. Назаров, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт»; М. А. Пирогова, канд. техн. наук, НИУ МЭИ; С. В. Попов, д-р техн. наук, Холдинг «Швабе»; А. Ф. Ронжин, д-р физ.-мат. наук, проф., Вычислительный центр им. А. А. Дородницына; П. О. Скобелев, д-р техн. наук, НАО «Группа компаний «Генезис знаний», СамГТУ; В. В. Соломин, канд. воен. наук, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; А. П. Солнцев, д-р воен. наук, проф., ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; Е. В. Судов, д-р техн. наук, проф., НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»; А. В. Цырков, д-р техн. наук, проф., ГКНПЦ им. М. В. Хруничева; В. А. Шахнов, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; Е. И. Шульгин, д-р техн. наук, НИЦ при президиуме АИН им. А. М. Прохорова

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»), 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### Инновационные технологии в решении комплексных задач управления и проектирования, моделирования и производства

Ванройе Н. К., Карпунин А. А., Расюк А. А. Событийно-ориентированный подход к анализу цифровой управляющей среды ..... 3

Пирогова М. А., Лешихина И. Е., Шведов Е. И., Краюшкин В. А. Практика использования компьютерного зрения и искусственного интеллекта для автоматизации процессов визуального контроля качества выполнения сборочных операций ..... 11

Правильщиков П. А. Международная квантово-компьютерная гонка и квантовые информационные технологии. Часть 2. (Обзор) ..... 20

### Информационные технологии в решении задач управления

Бутко А. О. Контроль параметров гальванических процессов с использованием машинного зрения ..... 31

### Современные методы и средства решения задач проектирования и моделирования. Объектно-ориентированное программирование

Жиленков А. А., Царева П. Е. Реализация эффективного алгоритма компьютерного моделирования обтекания тел жидкостью на базе уравнений Навье-Стокса и технологий CUDA ..... 40

### Методы и средства решения задач проектирования

Сергеев А. И., Гуньков С. А., Езерская Е. М., Попов А. Н. Алгоритм параметрического синтеза транспортной системы предприятия ..... 46

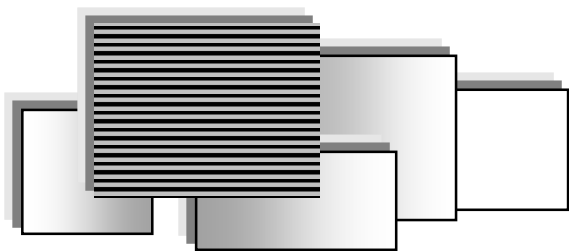
Феофанов А. Н., Колошкина И. Е. Автоматизация процессов проектирования фрезерных операций для станков с ЧПУ на основе элементов искусственного интеллекта ..... 51

Информационные технологии в проектировании и производстве: Науч.-техн. журнал /  
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2023. № 4 (192). С. 1—60.

Компьютерная верстка: *Н. В. Ильина, К. В. Трыкина*

☎ редакции (495) 491-43-17  
E-mail: [izdanie@ntckompas.ru](mailto:izdanie@ntckompas.ru)  
<http://ntckompas.ru>

Подписано в печать 04.12.2023.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,2.  
Заказ 2027. Тираж 250 экз.  
Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., 77,  
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».  
Отпечатано: 101000, Москва,  
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, помещ. IX,  
ком. 15, 16  
ООО «Спиди-Принт.ру»  
Индекс 79378.



## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕШЕНИИ КОМПЛЕКСНЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 381.3.06

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_4\_3

EDN: PREDTM

### СОБЫТИЙНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ЦИФРОВОЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СРЕДЫ

Н. К. Ванройе; А. А. Карпунин; А. А. Расюк

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

*Современные цифровые системы управления производством направлены на обеспечение оперативного реагирования и управления производственными процессами, их прозрачности и повышения производительности. Интеграция компонентов системы управления производством в режиме реального времени в единую цифровую среду позволяет отслеживать проблемы в ходе производственных циклов и в короткие сроки реагировать и принимать управленческие решения. Проведен системный анализ компонентов цифровой производственной среды, основанный на BPMN-моделях.*

**Ключевые слова:** цифровое производство, MES-система, процессное моделирование, BPMN, RUP, UML, event-driven архитектура, контроль производственных событий, real-time анализ производительности.

В условиях цифровой трансформации промышленности производственные процессы должны быть прозрачными и контролироваться в режиме реального времени [1, 2]. Для достижения этих целей необходимо реализовать цифровые механизмы управления производством как на стратегическом, так и на оперативном уровнях посредством внедрения средств сбора и обработки технической статистики и за счет формализации и агрегирования производственного опыта, как компонента цифровой интеллектуальной производственной среды. Компаниям необходимо своевременно отслеживать события, происходящие в ходе производственного цикла, оперативно принимать решения по устранению нештатных ситуаций, а также устранять нецелевые затраты временных и технических ресурсов, что обеспечивает снижение издержек в рамках концепции "Бережливого производства" [3—5].

Таким образом, следует оценивать различные затраты (закупки, расходные материалы, производственные и т. д.), которые можно выявить на основе производственных статистических от-

четов (потребление, незавершенное производство, операции по обслуживанию и т. д.). Статистические данные должны быть однозначными и емкими — информация, агрегированная в отчете, должна формировать недвусмысленные показатели, на основе которых должны быть приняты корректные управленческие решения [6—9].

В эпоху цифровой трансформации "умные" заводы могут автоматизировать производственные операции за счет контекстной осведомленности [10—12]. Модель контекстной осведомленности представляет собой способ настройки поведения системы или отдельных компонентов в зависимости от контекста выполнения работы для того, чтобы сделать её более эффективной. В контекстной модели под "Контекстом" понимается любая знаниевая информация, которая может быть использована в качестве характеристики ситуации и физического объекта, к которому она относится.

Учитывая, что умные заводы являются ключевыми компонентами Индустрии 4.0 [1, 2, 10—13], актуальным является создание инфор-

мационных управляющих производственных систем (*MES*, *Manufacturing Execution System*), обеспечивающих интеграцию производственных объектов посредством сети Интернет. Это позволяет в перспективе создавать интеллектуальные производственные системы [14, 15]. Являясь ядром типовой цифровой производственной системы, *MES* контролирует производственный процесс, в котором участвуют физически связанные производственные единицы, физические активы, оборудование. Современные заводы генерируют огромное количество производственных данных и развертывание *MES* сталкивается с определенными проблемами, такими как:

- проблема эффективного использования постоянно увеличивающегося объема регистрируемых производственных данных для поиска смысла (знаниевый аспект), зависимостей, связей и проблем в производстве, которые не очевидны;

- проблема аналитической обработки производственной информации для поддержки извлечения, хранения и анализа данных в целях получения наилучшего решения.

Цель данной работы — анализ подходов к системному анализу *MES*-решения в контуре цифрового производственного предприятия.

Для решения этой задачи рассмотрены основные этапы развертывания *MES*-решений и особенности их моделирования и системного анализа, предложены визуальные модели упо-

рядоченного и стандартизированного описания цифрового производства, формализованы базовые настраиваемые и библиотечные функции *MES*-системы с учетом добавленной стоимости в производственной цепочке.

### Анализ структурно-функционального состава *MES*

Проанализируем ключевые функции *MES*-системы с использованием инструментов визуального моделирования *RUP* (*Rational Unified Process*) [16–20]. Производственную систему следует рассматривать как активную систему, т. е. такую, в составе которой есть элементы, способные самостоятельно принимать решения [10, 12]. Следовательно, на первом шаге построения модели необходимо выявить основных участников производственного процесса. Согласно спецификациям *MES* [14, 15], к "пользователям" системы следует отнести следующие субъекты: *ERP* (*Enterprise Resource Planning*, планирование ресурсов предприятия) — система, *PLM* (*Product Lifecycle Management*, управление жизненным циклом продукции) — система, операторов технологических установок и технологов в роли администратора *MES*. Вариант диаграммы вариантов использования модели вариантов использования [16] для *MES*-системы представлена на рис. 1.

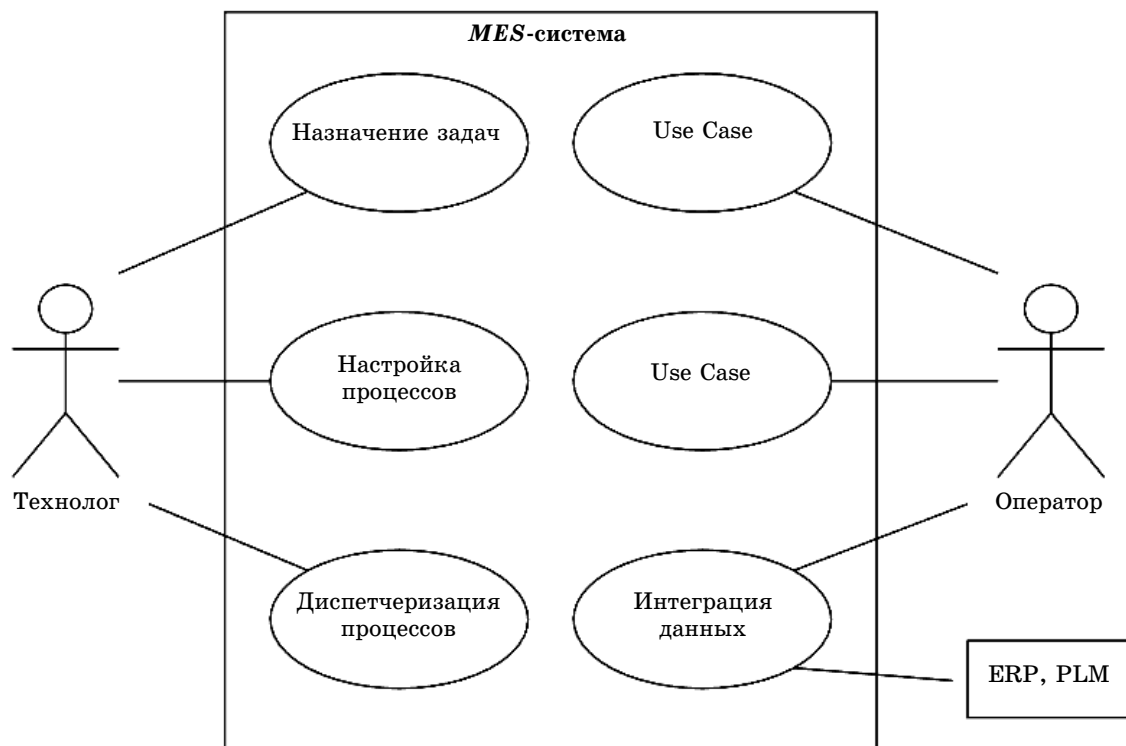


Рис. 1. Диаграмма прецедентов модели вариантов использования для *MES*-системы

Диаграмма модели вариантов использования содержит три действующих лица и шесть сценариев использования, а именно: администратор, оператор и *ERP/PLM* системы.

Администратор сопровождает систему, играя ключевую роль в конфигурации последовательностей операций для каждого производственного заказа. Таким образом, он обеспечивает мониторинг в режиме реального времени для оценки хода выполнения последовательных задач. Оператор обеспечивает входящий и исходящий обмен данными с технологическими установками, система собирает данные с помощью киберфизических компонентов для каждого вида деятельности [14]. *ERP*-система обменивается такими данными, как производственные заказы, графики, накладные на поставку и т. д.

Для дальнейшей детализации диаграммы модели вариантов использования построим визуальную модель с использованием инструментов визуального моделирования BPMN (*Business Process Model and Notation*) [21–25] с применением процессно-событийного подхода [13]. Процесс развертывания *MES*-решения реализуем в три фазы: анализ, проектирование и внедрение в цифровое производство. Диаграмма визуальной модели, иллюстрирующая эти фазы и действия предлагаемого подхода, показана на рис. 2.

В первой фазе — *Анализ* необходимо сфокусироваться на трех ключевых действиях, в пер-

вом действии определяют объем проекта, затем для каждого рабочего места в первой фазе описывают процесс работы с помощью диаграмм BPMN. Каждую диаграмму BPMN итерационно пересматривают с помощью разнообразных методик (например, исходя из требований "Бережливого производства") для выявления центров затрат и нецелесообразного расходования ресурсов. Результатом этой фазы является модель, содержащая формализованное представление каждого рабочего места с указанием причин и типов потерь.

Второй этап — *Разработка* основан на результатах предыдущего этапа. На этом этапе определяют потери, которые необходимо устранить в соответствии с концепцией компании, и устанавливают ключевые показатели мониторинга для каждого улучшения. На практике эти показатели формализуют и агрегируют в ключевые показатели эффективности и качества (*KPI*, *Key Performance Indicator*, *KQI*, *Key Quality Indicator*) [26–28]. Затем формируется состав функции *MES* для устранения выявленных потерь и строится соответствующая визуальная модель в соответствии с процессом развертывания *MES*-решения. В результате данного этапа формируется предложение, полученное в результате системного анализа производственной системы, для бесшовной интеграции.

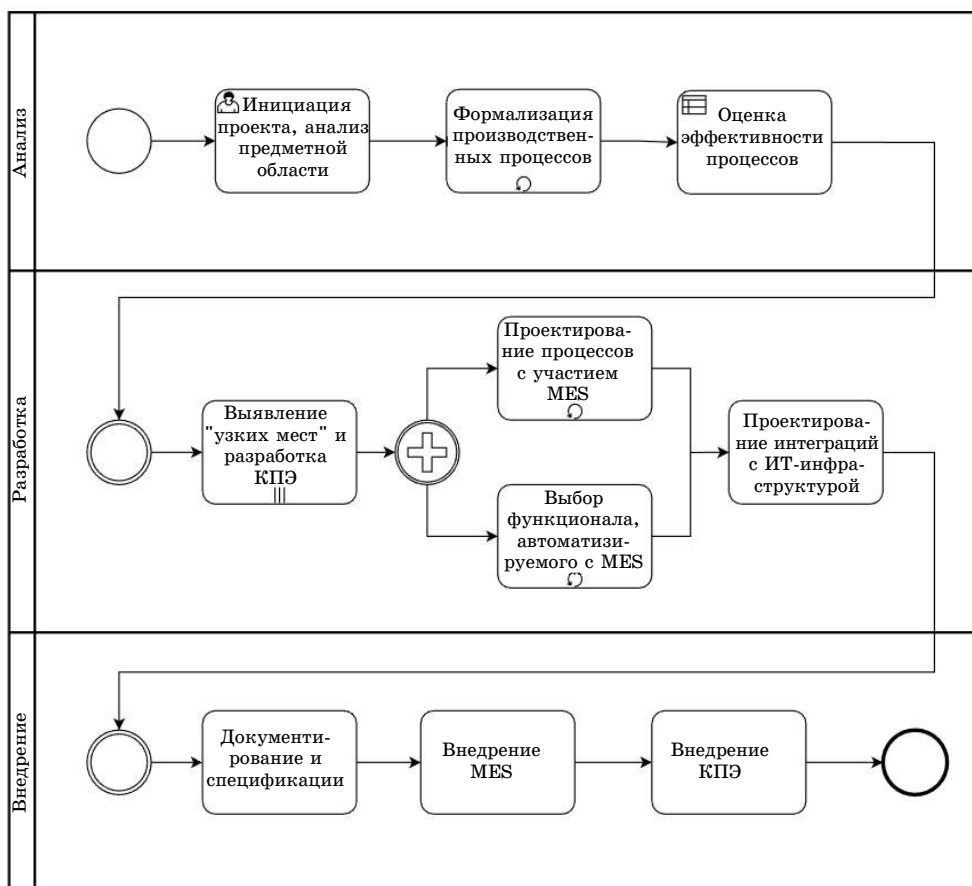


Рис. 2. Процессно-событийная модель интеграции *MES*-решения в цифровую среду

На третьем этапе — *Внедрение* происходит реализация системы на основе результатов предыдущего этапа. Для этого формализуются требования к программному и аппаратному обеспечению для достижения желаемых результатов [29—31]. После этого осуществляют непосредственную реализацию и ввод в эксплуатацию системы (датчики, промышленные ПК, терминалы сбора данных и т. д.). В конце этого этапа утверждают показатели, позволяющие оценить изменение техноэкономических показателей на основе модернизации исследуемого процесса. Впоследствии ключевые показатели итеративно уточняют и регулярно улучшают по сравнению с ранее определенными показателями.

#### Разработка подсистемы контроля технических показателей

Предлагаемый подход предусматривает создание *MES* в виде мультиагентной системы, которая состоит из субагентов и центрального менеджера (промежуточное программное обеспечение, работающее на сервере *MES*). Агент разработан как виртуальная цифровая оболочка каждого физического объекта производственной линии [11, 32]. Основная идея применяемого агентного подхода заключается в использовании субагента в качестве цифрового помощника для сбора данных, которые генерируются оборудованием во время производства. Функции центрального менеджера обеспечивают общую координацию агентной среды и идентификацию их аномального поведения. Такое решение относится к категории централизованных мультиагентных систем.

Данное решение предусматривает выполнение следующих этапов:

- мониторинг — этот шаг выполняется субагентом каждого активного элемента, данные генерируются во время производственного процесса, контролируемого субагентом;
- сбор данных — производственные данные собираются и хранятся субагентом в процессе производства, выбранные характеристики данных будут использованы для построения модели поведения;
- моделирование — для изучения модели поведения системы, субагенты передают выборку данных центральному агенту, который работает на сервере.

Посредством вышеуказанных этапов необходимые данные будут извлечены из всего массива производственных данных. Извлеченные данные вводят в модель для получения среднего значения и дисперсии для построения модели нормального поведения. Чтобы отличить аномальное поведение, можно использовать статистическую модель для определения нормального поведения системы на основе собранных метрик. Обобщенный алгоритм предиктивного ана-

лиза и управления производственной системой включает следующие основные действия [33, 34]:

- обнаружение аномалий — центральный агент применяет статистический тест для определения нормального или аномального поведения в соответствии с данными;
- принятие решений — при обнаружении аномалии центральный агент должен быстро определить причину аномального поведения, отметить соответствующий субагент(ы) и выработать новое решение для корректировки поведения физических активов через субагент(ов) (на сервере также хранится репозиторий топологии системы, если решение требует реконструкции топологии системы, репозиторий топологии также должен быть обновлен);
- корректировка поведения — центральный агент посылает команды субагенту, который связан с возникновением аномалии, при этом текущая корректировка поведения возможна вплоть до отключения субагента и связанного с ним оборудования при обнаружении аномального поведения.

Следует учитывать, что в производственных операциях события происходят непрерывно [35]. Материалы и комплектующие поступают на соответствующие операции, оборудование может сообщать о сбоях, системы контроля качества или статистического управления процессами сообщают о выходе за пределы заданных условий и так далее. Определение того, является ли производственное событие важным и как его следует обрабатывать, варьируется и зависит от сложности каждой операции. На рис. 3 приведено обобщение и систематизация ситуаций на различных уровнях управления, которые могут являться критическими для производственной системы в целом.

Простые события обычно обрабатываются непосредственно контролирующими системами, которые их отслеживают и обычно они не передаются на обработку другим системам верхнего уровня. Однако в ряде сценариев могут быть реализованы более сложные процедуры для логики обнаружения корреляции сложных событий, использующие регистрируемые простые события для обнаружения определенных ситуаций, которые в других случаях будут происходить незамеченными. Этот вариант более применим, когда задействованные события происходят на разных производственных уровнях. Например, в процессе, контролирующем производство с ограничениями по времени, необходимо обратить внимание на любую ситуацию, которая может изменить ожидаемый план производства, с тем чтобы были предприняты специальные меры для обеспечения ожидаемых сроков поставки. О возникновении неблагоприятных ситуаций можно судить по информации о партиях некачественной продукции, которая может быть выявлена по конкретным вышедшим из-под контроля показателям процесса низкого уровня.



	Качество	Исполнение процессов	Техническое обслуживание	Энергопотребление
Уровень предприятия	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Контроль соответствия параметров работы машины Соглашению об уровне обслуживания</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Контроль количества готовых партий для определения окончания производства.</li> <li>– Обнаружить задержку материалов, необходимых для производства</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Выявление невыполненных задач профилактического обслуживания.</li> <li>– Выявление увеличения количества операций по техническому обслуживанию для рассмотрения возможности обновления машины</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Выполнение планов по экономии энергии.</li> <li>– Выявление причин роста энергопотребления</li> </ul>
Уровень цеха	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Выявление сбоев в работе производственной линии при обнаружении последовательных некачественных готовых изделий</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Контроль количества обработанных деталей для выявления завершения обработки партий.</li> <li>– Выявление необходимости изменения графика производства, когда некоторые станки выходят из строя</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Прогнозирование технического обслуживания на основе загрузки машин линии продукции.</li> <li>– Контроль корректирующего обслуживания SLA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Отклонение потребления процессов обработки.</li> <li>– Автоматическое выключение оборудования, когда его используют</li> </ul>
Уровень процессов	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Контроль соответствия параметров работы машины Соглашению об уровне обслуживания</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Контроль количества выполненных операций для определения окончания процесса обработки</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Мониторинг рабочих параметров станка для выявления выхода за пределы нормы</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Мониторинг пиков энергопотребления для прогнозирования смены обрабатываемого инструмента.</li> <li>– Мониторинг энергопотребления для отключения компонентов станка при слишком длительном простое</li> </ul>

Рис. 3. Контролируемые ключевые показатели по уровням производства

Измерения показателей производственной цепочки важны, поскольку они могут указать на слабые стороны производственной системы или выявить малоэффективные процессы. Однако улучшение производства и внутренний анализ — не единственный способ использования оценки, можно также использовать сравнительный анализ собственной производительности с близкими по профилю компаниями (метод аналогий).

Сами по себе контрольные события не могут дать полной информации о состоянии производственных процессов, необходимой для осуществления эффективных улучшений. Для сбора данных существует множество подходов. В качестве инструментов сбора данных используют беспроводные сенсорные сети, радиочастотные индикаторы (RFID), различные киберфизические элементы и мобильные устройства [36, 37].

Применяя методы анализа данных, обладая знаниями предметной области и процессов, можно разработать и внедрить ключевые показатели KPI&KQI [26—28]. Однако данные показатели — это лишь один из возможных вариантов использования собранных производственных данных. Тем не менее, с помощью правильно подобранного набора данных, лица, принимающие управленческие решения, получают возможность принимать эти решения взвешенно, тем самым обеспечивая системное движение предприятия в направлении выполнения стратегических целей.

Данные показатели следует рассматривать, как знаниевый — информационный актив компании, который собирается для отслеживания эффективности работы системы, человека, ПО или чего угодно, представляющего интерес.

Ключевой показатель — это обычно величина, индекс, процент или другое сравнение, при котором параметр измеряется через регулярные промежутки времени и сравнивается с одним или несколькими критериями. С помощью ключевых показателей компании могут оценить разрыв между текущими и целевыми показателями своей деятельности в общем процессе и на уровнях атомарных процессов. Кроме того, такие концепции рационализации процессов, как, например, "Бережливое производство" и сокращение отходов также могут быть реализованы на основе подхода, основанного на измерении ключевых показателей (ISO 22400:2:2014).

Промышленные ключевые показатели можно классифицировать на основе их практического назначения и разделить их на восемь классов. К этим классам относятся: энергетические, сырьевые, эксплуатационные, производственные, контролирующие производительность, складские и резервные запасы, техническое обслуживание, планирование и показатели оборудования. В таблице представлены классы, дано краткое описание каждого из них и представлены возможные ключевые показатели для каждого класса.

Все это является частью производственных знаний, которыми необходимо управлять, включая конкретные требования к сбору данных, логику обнаружения простых событий и корреляции сложных событий и, наконец, процедуры, касающиеся того, как действовать в результате [1, 2]. Это предполагает участие персонала и выполнение определенных автоматизированных действий, находящихся за рамками производственного процесса, включая деятельность на уровне управления и иногда принятия решения.

Классификация производственных ключевых показателей

Класс	Описание	Пример
Затраты энергоресурсов	Характеризует энергопотребление	Потребление электроэнергии
Расход сырья	Характеризует расход сырья на изготовление	Отходы / Производимая продукция
Производительность	Качество продукции, скорость изготовления	Количество циклов управления в ручном режиме / общее количество циклов управления
Техническое обслуживание	Организация технического обслуживания влияет на производство, при недостаточности технического обслуживания происходят производственные потери из-за аварийных остановок	Периодичность технического обслуживания
Планирование	Планирование и построение графиков влияет на загрузку производственных мощностей	Коэффициент загрузки оборудования
Использование запасов и резервов	Учет товарно-материальных запасов является важной частью производства в связи с дороговизной крупных запасов, тогда как слишком маленькие могут привести к перебоям в производстве	Производительность / Средние запасы сырья
Показатели оборудования	Эффективность эксплуатации оборудования, износ оборудования, зависящий от продолжительности работы, интенсивности, нагрузки или количества запусков	OEE (Overall Equipment Effectiveness) — Общая эффективность оборудования, коэффициент износа, амортизация и т. п.

### Анализ особенностей ввода MES-системы в эксплуатацию

Внедренное решение должно устранить недостатки, выявленные в стадии анализа, и теперь оно должно быть адаптировано к цифровой производственной среде, а именно: источнику данных, оборудованию, протоколам и стандартам и т. д. На этой стадии физически формируют требования к программному и аппаратному обеспечению для достижения ожидаемых результатов. После этого реализуется конкретное программное и аппаратное обеспечение системы. По итогам развертывания системы оценивают показатели производительности для сравнения с начальными значениями. Это сравнение капитализирует улучшение и намечает другие итерации непрерывного улучшения на основе достоверных данных.

### Заключение

В интегрированной цифровой индустрии информационная система играет решающую роль по контролю и управлению производством в режиме реального времени. Она повышает оперативность реагирования руководства, используя собранные данные и отправляя их на все рабочие места через MES-систему. В данной работе предложен системный подход к внедрению MES-системы в условиях цифровой трансформации промышленности, который базируется на оценке производственной системы с помощью процессно-событийного моделирования в целях локализации точек потерь.

Можно констатировать, что интеграция MES-системы с аналитическими инструментами (такими, как системы предиктивного анализа [33, 34], прогнозирования и т. д.) могут улучшить производственные показатели предприятия,

что в конечном итоге соответствует стратегическим и функциональным целям "умной фабрики" [10]. Дальнейшие исследования процессно-событийных моделей будет направлено на развитие функционала регистрации и отслеживания производственных событий и расчета ключевых показателей процессов на предприятии.

### Литература

1. Курносенко А. Е., Шахнов В. А. Цифровая трансформация при подготовке производства изделий электронной техники // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 51—56.
2. Курносенко А. Е., Шахнов В. А. Моделирование цифрового производства электронной аппаратуры в рамках концепции "Индустрия 4.0" // Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии: мат. I Междунар. науч.-техн. конф. — Екатеринбург, ИЭ УО РАН. 2019. С. 585—594.
3. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Системный анализ "Бережливого производства" инструментами визуального моделирования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 4(160). С. 19—24.
4. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Система 5S — технология создания эффективного рабочего места в концепции "Бережливого производства" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1(161). С. 65—68.
5. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Картирование потока создания ценностей в концепции "Бережливого производства". 2016. № 2(162). С. 23—27.
6. ГОСТ ISO 9000-2015. Межгосударственный стандарт. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь / Справочно-правовая система "Консультант-Плюс" [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: [www.consultant.ru/](http://www.consultant.ru/) (дата обращения: 08.02.2023).
7. ГОСТ Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции.

Методология функционального моделирования / Справочно-правовая система "Консультант-Плюс" [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: [www.consultant.ru/](http://www.consultant.ru/) (дата обращения: 08.02.2023).

8. Бизнес-процессы промышленного предприятия: учеб. пособие / под ред. Кельчевской Н. Р. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 339 с.

9. Барановский В. Ю., Зайченко И. М. Формирование стратегической карты управления предприятием на основе концепции цифровой трансформации бизнеса // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2018. № 3.

10. Kurnosenko A. E., Lysenko O. A., Vlasov A. I. Trend analysis in the development of factories of the future, taking into account digital transformation of active systems // ACM International Conference Proceeding Series, DEFIN 2021. 2021. № 3490881.

11. Shakhnov V. A., Kurnosenko A. E., Demin A. A., Vlasov A. I. Industry 4.0 visual tools for digital twin system design // Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. Proceedings of 4th Computational Methods in Systems and Software 2020. V. 2. 2020. P. 864—875.

12. Janiesch C., Matzner M., Müller O. A Blueprint for Event-Driven Business Activity Management // BPM 2011. Springer, Heidelberg. LNCS. 2011. V. 6896. P. 17—28.

13. Карпунин А. А., Смагулов Н. Б., Миронов А. А. Процессно-событийная модель ЕРС для разработки визуальных моделей производственных систем: труды междунар. симпозиума "Надежность и качество". 2021. Т. 1. С. 147—154.

14. Ванройе Н. К., Власов А. И., Денисова Д. И. Анализ роли MES-системы в составе киберфизической производственной системы // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 4 (188). С. 11—21.

15. Mantravadi S., Cheng Y., Müller C. MES/MOM systems for Manufacturing Networks // An exploratory study from operations in India. 22nd Cambridge International Manufacturing Symposium. 2018. P. 27—28.

16. Кознов Д. В. Основы визуального моделирования. — Москва, Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ). 2008.

17. Власов А. И., Марикова Е. А. Анализ методов визуального моделирования сложных систем // Динамика сложных систем — XXI век. 2020. Т. 14. № 3. С. 5—22.

18. Власов А. И. Пространственная модель оценки эволюции методов визуального проектирования сложных систем // Датчики и системы. 2013. № 9(172). С. 10—28.

19. Власов А. И. Концепция визуального анализа сложных систем в условиях синхронных технологий проектирования // Датчики и системы. 2016. № 8—9(206). С. 19—25.

20. Власов А. И. Системный анализ технологических процессов производства сложных технических систем с использованием визуальных моделей // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 10—2(17). С. 17—26.

21. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Применение визуальных инструментов BPMN для моделирования технологической подготовки производства (Обзор) // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 1(177). С. 14—26.

22. Vlasov A. I., Gonoshilov D. S. Simulation of manufacturing systems using BPMN visual tools //

J. Physics: Conference Series. HIRM 2019. 2019. № 012043.

23. Власов А. И., Гоношилов Д. С. Системный анализ производства с использованием визуальных инструментов BPMN // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 3(175). С. 10—16.

24. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Методы формализации когнитивной графики и визуальных моделей с использованием схем XML // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2021. № 1(134). С. 51—77.

25. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Анализ средств разработки визуальных BPMN-моделей сложных систем // Динамика сложных систем — XXI век. 2020. Т. 14. № 1. С. 5—22.

26. Карпунин А. А., Муравьев К. А. Методика оценки ключевых показателей эффективности телекоммуникационных систем: сб. "Энергосбережение и эффективность в технических системах". Мат. IX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. 2022. С. 128—130.

27. Леонидов В. В., Муравьев К. А. Подходы к анализу качества в телекоммуникационной сфере: сб. "Энергосбережение и эффективность в технических системах". Мат. IX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. 2022. С. 137—138.

28. Власов А. И. Визуальное моделирование эффективности сервисов киберфизических систем: сб. "Энергосбережение и эффективность в технических системах". Мат. IX Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием для студентов, молодых ученых и специалистов. 2022. С. 26—27.

29. Witsch M., Vogel-Heuser B. Towards a formal specification framework for manufacturing execution systems // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2012. № 8(2). № 6145656. P. 311—320.

30. Демин А. А., Карпунин А. А., Ганев Ю. М. Методы верификации и валидации сложных программных систем // Программные продукты и системы. 2014. № 4. С. 229—233.

31. Власов А. И., Карпунин А. А., Курышев Р. Э. Визуальное моделирование SMART-технологий проектного управления // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. Т. 1. С. 64—70.

32. Hribernic K., Cabri G., Mandreoli F., Mentzas G. Autonomous, context-aware, adaptive Digital Twins—State of the art and roadmap // Computers in Industry. 2021. 133 (3). Режим доступа: URL: <https://www.journals.elsevier.com/computers-in-industry/call-forpapers/autonomous-context-aware-adaptive-digital-twins> (дата обращения: 01.12.2021).

33. Селиванов К. В., Власов А. И., Климачев В. С. Комплекс предиктивного мониторинга распределенных сенсорных сетей. Св-во о регистрации программы для ЭВМ 2022665632, 18.08.2022. Заявка № 2022663882 от 22.07.2022.

34. Strelkowski W., Vlasov A. I., Selivanov K. V., Muraviev K. A., Shakhnov V. A. Prospects and Challenges of the Machine Learning and Data-Driven Methods for the Predictive Analysis of Power Systems // Energies. 2023. № 16(10). № 4025.

35. Vlasov A., Naumenko A. Analysis of visual modeling tools development for complex production systems // Lecture Notes in Information Systems and Organisation. DTI. 2022. P. 335—346.

36. Власов А. И., Михненко А. Е. Информационно-управляющие системы для производителей электроники // Производство электроники. 2006. № 3. С. 15—21.

37. Власов А. И., Михненко А. Е. Принципы построения и развертывания информационной системы предприятия электронной отрасли // Производство электроники. 2006. № 4. С. 5—12.

## EVENT-ORIENTED APPROACH TO ANALYSIS OF DIGITAL CONTROL ENVIRONMENT

N. C. Vanroye, A. A. Karpunin, A. A. Rasyuk  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*Modern digital production management systems are aimed at ensuring rapid response and management of production processes, their transparency and increased productivity. Integration of real-time production management system components into a single digital environment allows you to monitor problems during production cycles and quickly respond and make management decisions. The work carried out a system analysis of the components of the digital production environment based on BPMN models.*

**Keywords:** digital manufacturing, MES system, process modeling, BPMN, RUP, UML, event-driven architecture, control of production events, real-time performance analysis.

---

**Ванройе Никита Клод**, аспирант кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: nvanroje@mail.ru

**Карпунин Алексей Александрович**, старший преподаватель кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: alexk@yandex.ru

**Расюк Александр Александрович**, магистрант кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: rasyuk2a@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2023 г.

УДК 338.364

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_4\_11

EDN: QAJLLU

## ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

М. А. Пирогова, канд. техн. наук; И. Е. Лешихина, канд. техн. наук, Е. И. Шведов  
ФГБОУ ВО НИУ «Московский энергетический институт», Москва, Россия

В. А. Краюшкин, канд. техн. наук  
ООО «Продуктивные технологические системы», Москва, Россия

*Рассмотрены возможности использования технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта для повышения производительности и эффективности выполнения контроля качества сборочных операций. Технологии компьютерного зрения и искусственного интеллекта использованы при разработке прототипа рабочего места инспектора качества, проанализированы их специфика и особенности практического применения.*

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, машинное зрение, датасеты, классификация, цифровая трансформация производства.

Применение передовых информационных технологий для решения задач управления качеством становится важным фактором цифровизации современного промышленного производства. При этом цифровая трансформация операций контроля качества для предприятий дискретного производства основывается на использовании технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта. В [1] авторами были рассмотрены примеры применения передовых информационных технологий для автоматизации процессов визуального контроля качества выполнения сборочных операций, сообщалось о развертывании прототипа рабочего места инспектора качества, предназначенного для проведения работ по определению практической применимости предлагаемых решений.

При разработке прототипа рабочего места инспектора качества авторы [1] руководствовались следующими требованиями:

- в организации рабочего места должно использоваться открытое программное обеспечение, а также аппаратное обеспечение, которое не подпадает под санкционные ограничения либо является объектом параллельного импорта;
- рабочее место должно иметь возможность быстрой перенастройки (не переделки) при изменении номенклатуры контролируемых сборок;
- для более эффективного выполнения процессов внедрения при создании рабочего места необходимо максимально использовать апробированные алгоритмы, программы и системы компьютерного зрения и искусственного интеллекта;
- при разработке прототипа рабочего места необходимо максимально задействовать доступные для применения на территории РФ библиотеки и программные компоненты искусственного интеллекта.

С учетом вышеприведенных требований, принимая во внимание уже имеющиеся наработки по использованию передовых информационных технологий для преодоления проблем управления качеством, при разработке прототипа рабочего места инспектора качества были определены задачи и подходы к их решению:

1. Основной является задача определения качества изделия по его изображению (распознавание изделий средствами технологии компьютерного зрения и дальнейшей классификации распознанных изображений объектов за счет применения нейронных сетей).

2. Задачу классификации изображений можно эффективно решать, применяя модели нейронных сетей глубокого обучения (*DNN*). Поэтому проблеме определения уровня качества предлагается свести к решению задачи классификации в терминах машинного обучения на базе нейронных сетей.

3. Задачи искусственного интеллекта было решено выполнять на базе популярных и свободных от санкционных ограничений фреймворков машинного обучения, включая *TensorFlow* и *PyTorch*.

4. Считая разработку собственных нейронных сетей экономически нецелесообразной, было решено применить готовые модели сверточных нейронных сетей. При этом перенастройку таких сетей под новый набор объектов производить, используя методику трансферного обучения моделей классических нейронных *DNN*-сетей (*transfer learning*).

5. Разработку компонент компьютерного зрения было решено выполнять на базе доступного в России открытого аппаратного комплекта *nVIDIA Jetson*, вариант *Nano 4GB* с использованием библиотек компьютерного зрения.



6. В качестве операционной системы выбрана *Ubuntu 18.04* (клон *Linux*).

7. Для захвата видеопотока предполагается ориентироваться на использование доступных в России *CMOS-Web*-камер с разрешением  $1280 \times 720$ .

Как видно из приведенного списка, задачи компьютерного зрения можно решать в основном за счет использования *SoC*-устройства *nVIDIA Jetson Nano* под управлением операционной системы *Ubuntu 18.04*, что позволяет в такой конфигурации применять программные компоненты фреймворков *TensorFlow* и *PyTorch*. Задачу классификации распознанного с помощью компьютерного зрения изображения объекта предлагается решать методом трансферного обучения на пользовательском наборе изображений с применением готовой модели *DNN*, причем выбор модели *DNN* предлагается делать с учетом того, насколько она подходит для работы в составе прототипа рабочего места инспектора качества, а также ее доступности для применения на территории РФ.

#### Практика использования компьютерного зрения и трансферного обучения в составе прототипа рабочего места инспектора качества

Аппаратный состав прототипа рабочего места инспектора качества схематически был представлен в работе [1, рис. 3]. В рамках настоящей статьи рассмотрим подробнее программное обеспечение прототипа. Структура предлагаемого авторами программного комплекса приведена

в виде схемы взаимосвязанных процессов, моделей и наборов данных на рис. 1.

Структура программного комплекса (рис. 1) условно делится на две составляющие: программный комплекс подготовки нейронной сети для классификации изделий в зависимости от исполнения; программное обеспечение, непосредственно загружаемое и используемое на рабочем месте инспектора. В показанной на рис. 1 структуре возможно использование программных компонент искусственного интеллекта из библиотечного набора для нейронных сетей глубокого обучения *train*, *onnx\_export* и *imagenet*, исходные коды которых выложены на открытом неподсанкционном ресурсе *GitHub* как в виде программ на *C*, так и в виде текстов *Python*. Также при разработке прототипа был легально использован библиотечный комплекс *PyTorch*, написанный на *Python* и проверенный в окружении системных утилит и языковых *Python*-сред в составе ОС *Ubuntu 18.04* на *nVIDIA Jetson Nano*. В результате у разработчиков появилась возможность доработки программных модулей. Модуль *train.py* был доработан в соответствии с составом датасетов пользователя, а модуль *imagenet.py* — в соответствии с составом типовых реакций, таких как указание на отбор нужного объекта роботу-манипулятору, звуковой сигнал, изменение цвета на табло, оповещение о наличии нужного объекта и т. д.

Как следует из рис. 1, перед разработчиком рабочего места инспектора качества встают практические задачи, решение которых определяет работоспособность рабочего места в целом, а также трудоемкость его освоения и использования заказчиком, т. е. инспекторами качества выпускаемых изделий.

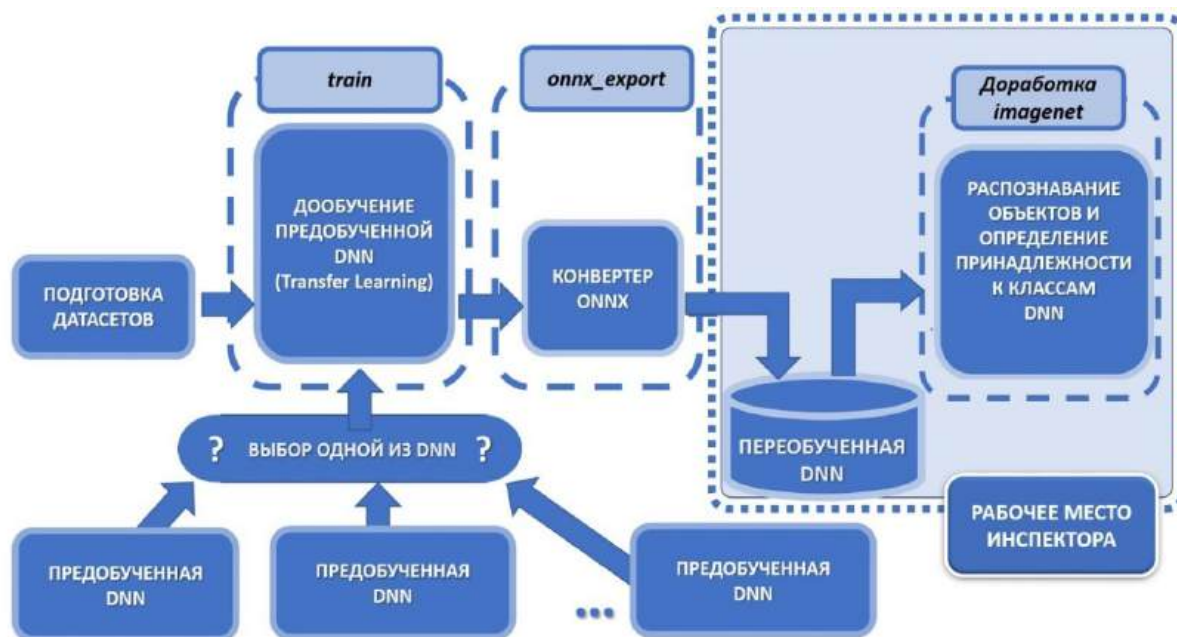


Рис. 1. Структура программного комплекса для прототипа рабочего места инспектора качества

Исследования алгоритмов глубокого обучения, проведенные Шолле Ф. [2], а также публикация по трансферному обучению [3] показывают, что эффективность применения методов искусственного интеллекта зависит от двух аспектов:

- от качества подготовки данных пользователя (датасетов), используемых для трансферного обучения какой-либо из моделей претренированных *DNN*-сетей;
- от правильного выбора претренированной модели сети глубокого обучения из доступных открытых *DNN*-сетей.

### Подготовка датасетов

Создание набора данных (датасета) является неотъемлемым шагом в процессе машинного обучения. Датасет представляет собой коллекцию примеров, на основе которых модель машинного обучения будет выполнять процесс трансферного обучения. После выполнения трансферного обучения дообученная сеть уже может самостоятельно в составе поста инспектора обслуживать входной поток изображений проверяемых изделий, классифицируя каждый кадр этого потока в соответствии с результатом обучения, используя предложенные заказчиком новые классы. При таком процессе качественные и количественные характеристики отдельных изображений в каждом датасете имеют решающее значение, а процесс подготовки датасетов становится важным и необходимым для получения эффективного результата.

Применение искусственного интеллекта для разрабатываемого прототипа рабочего места инспектора по качеству означает использование машинного обучения в модификации трансферного обучения. Трансферное обучение, как одна из технологий искусственного интеллекта и глубокого обучения, предназначено для использования уже существующих знаний с переносом их применения в дополнительную или вообще новую область знаний [4]. В случае классификации потока входных изображений существующими знаниями будет считаться набор изображений, на которых получена классификационная составляющая выбранной модели *DNN*-сети, т. е. классификация, полученная в результате глубокого обучения на исходной модели *DNN*-сети, а новой областью знаний будет требуемая для визуального определения качества дополнительная классификация, получаемая в результате обучения той же модели *DNN*-сети, но на дополнительном наборе входных данных. Именно дополнительный набор входных данных и содержит изображения всех тех объектов заказчика, которые необходимо проверить на соответствие тому или иному классу по критерию "качество". На рис. 1 такой дополнительный необходимый для трансферного обучения процесс определен как "подго-

товка датасетов". Формирование достаточного количества изображений различных классов, определяющих понятие "качество", зависит от требований процесса обучения, которые, в свою очередь, определяются содержанием собственно процесса обучения нейронной сети.

По результатам обсуждений и консультаций со специалистами потенциальных заказчиков разрабатываемого рабочего места в качестве проверочной была выбрана задача по распознаванию базовых компонентов (классификации комплектующих) перед сборкой электронных изделий. Для распознавания были предложены *SBC*-устройства, выполненные в одном и том же форм-факторе, но различающиеся по расположению отдельных компонент: *Raspberry Pi B4*, *Raspberry Pi B3-Plus*, *Raspberry Pi B2*, *Banana Pi BPI-M5*, *Banana BPI-W2*. Для задач проверки работоспособности прототипа рабочего места было решено добавить в датасеты еще один объект — программируемый контроллер *ESP-8266*, существенно отличающийся от остальных объектов по форм-фактору. В датасет каждого из классифицируемых объектов было помещено около 2000 его фотографий, выполненных при различном освещении, под различными ракурсами и в разном окружении.

В соответствии с условиями применения алгоритма трансферного обучения после формирования датасетов каждый из них был разбит для каждого из объектов на три "подсета": на обучающую<sup>1</sup> ("*train*"), валидационную<sup>2</sup> ("*val*") и тестовую<sup>3</sup> ("*test*") выборки. Важно сохранять строгую независимость между этими тремя выборками. Это означает, что каждый пример данных должен принадлежать только одной из выборок, и не должно быть перекрестного пересечения между ними. Общепринятый способ разбиения данных [2] включает их случайное перемешивание перед разделением на выборки. Это означает, что необходимо случайным образом перемешать весь датасет и затем разделить его на обучающую, валидационную и тестовую выборки в определенном соотношении, напри-

<sup>1</sup> Обучающая выборка — часть датасета, которая используется для обучения модели. Она должна составлять большую часть доступных данных (обычно 70—80 %). Обучение и переобучение нейронной сети происходит именно на этой выборке.

<sup>2</sup> Валидационная выборка — часть датасета, которая не используется во время обучения, но используется для настройки гиперпараметров модели и оценки ее производительности. Это помогает контролировать переобучение и выбирать лучшие гиперпараметры.

<sup>3</sup> Тестовая выборка — независимая часть датасета, которая не используется ни во время обучения, ни во время настройки гиперпараметров. Она служит для финальной оценки точности модели после выбора всех параметров и гиперпараметров. Тестовая выборка дает оценку того, насколько хорошо модель обрабатывает новые данные. На базе тестовой выборки и строится предсказательная часть трансферного обучения: на основании обучения сети на тестовой выборке с учетом достигнутого значения "*accuracy*" и показателя "*loss*" вырабатывается предсказание о принадлежности наблюдаемого образца к какому-либо из классов.

мер, в соответствии с рекомендациями [2], когда 70 % от перемешанного датасета формируют подсет "train", 20 % — подсет "val" и 10 % — подсет "test".

### Дообучение предобученной нейронной сети

Схематически процесс обучения нейронной сети на дополнительном наборе данных — трансферное обучение на датасетах пользователя — представлен на рис. 2.

Схема (рис. 2) является модификацией иллюстрации к материалу по трансферному обучению, размещенному в блоге "Transfer Learning" как "быстро обучить нейросеть на своих данных" [5]. В отличие от [5], в качестве модели сети и претренированных весов модели использовалась не одна сеть, а несколько открытых сетей в целях определения на практике наиболее подходящей модели сети по критериям "точность" и "потери". Кроме того, тестовый конвейер был организован только в процедуре претренинга и не использовался для захвата видеопотока камерой непосредственно на прототипе рабочего места инспектора. Как следует из общей схемы (см. рис.1), претренинг (рис. 2) заканчивается конвертацией и архивацией претренированной сети, т. е. получением переобученной DNN. Все дальнейшие действия на прототипе рабочего места инспектора производятся вне структурной схемы процесса трансферного обучения, представленной на рис. 2, а классификация входного потока осуществляется совсем другим моду-

лем распознавания, для которого в качестве нейронной сети используется архив обученной DNN.

Программная реализация трансферного обучения выполнялась несколько раз для каждой из выбираемых моделей сети. При этом состав и структура датасетов для каждого акта трансферного обучения не менялись, были одинаковы для всех моделей сети. Программная реализация процесса трансферного обучения (рис. 2) выполнялась за счет модификации и перенастройки модуля *train.py* на датасеты пользователя.

### Выбор претренированной модели сети глубокого обучения

Для трансферного обучения прежде всего производился выбор основы, то есть наиболее подходящей предобученной модели нейронной сети глубокого обучения. Из работы Ферлиша Э. [4] следует, что максимальная эффективность достигается при использовании моделей DNN с дополнительным конволюционным покрытием в слоях. В результате проведенных в этом направлении исследований для дальнейшей оценки применимости в процессе трансферного обучения были отобраны доступные для работы на платформе *nVIDIA Jetson* модели сети *ResNet18*, *ResNet101*, *ResNet152*, *GoogleNet12* и *AlexNet*, наиболее ориентированные на классификацию изображений.



Рис. 2. Структурная схема процесса трансферного обучения. Дообучение предобученной нейронной сети:

1 — выбираемая модель DNN-сети; 2 — получение характеристик процесса обучения ("потери" на конвейере тренировочного подсета датасетов и "точность" на конвейере валидационного подсета датасетов); 3 — получение предсказательного значения принадлежности к новым классам на конвейере тестового подсета датасетов; 4 — претренировочные веса выбираемой модели DNN-сети; 5 — подготовленные для трансферного обучения датасеты

Основными характеристиками, повлиявшими на выбор в пользу применения той или иной модели сети, стали точность выполнения классификации ("Accuracy") и показатель потерь ("Loss"). Сначала отобранные модели сети были протестированы на заранее подготовленных датасетах, при этом на каждом этапе (эпохе) обучения фиксировались получаемые в каждой из ветвей расчета значения "Train Loss" и "Train Accuracy", а также "Validation Loss" и

"Validation Accuracy" (см. рис. 2). Для задачи сравнения количество эпох в ходе тестирования для всех моделей сети было ограничено 20-ю, что, как оказалось в дальнейшем, было достаточным для получения вывода о преимуществах/недостатках той или иной модели сети. На рис. 3—7 представлены результаты эксперимента — графики зависимости точности и потерь обучения от эпохи для каждой модели сети.

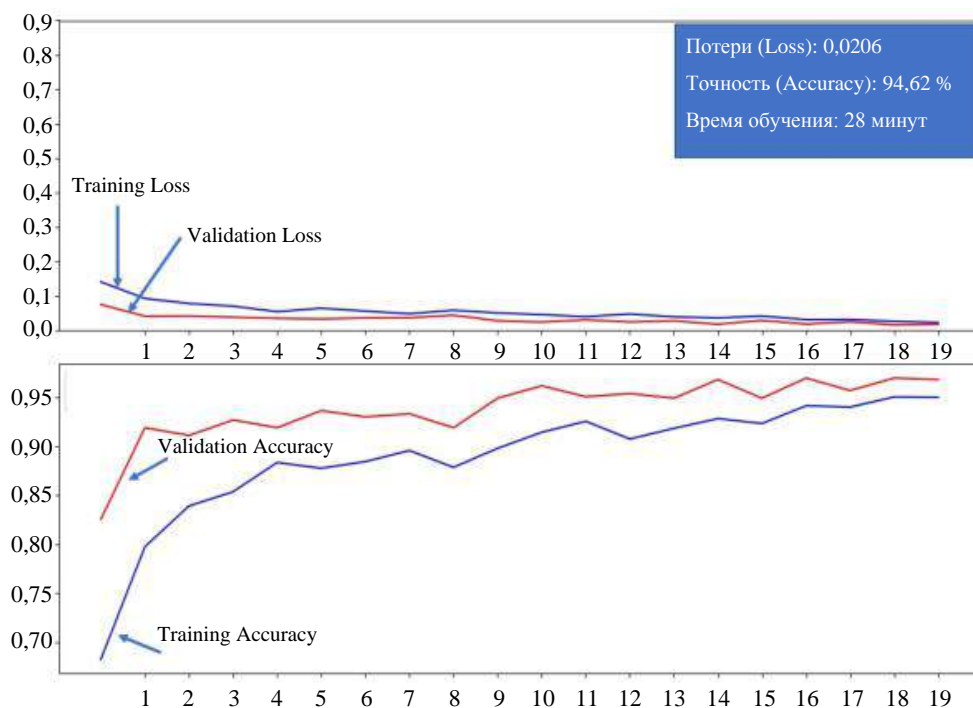


Рис. 3. График зависимости точности и потерь от эпохи для сети ResNet18

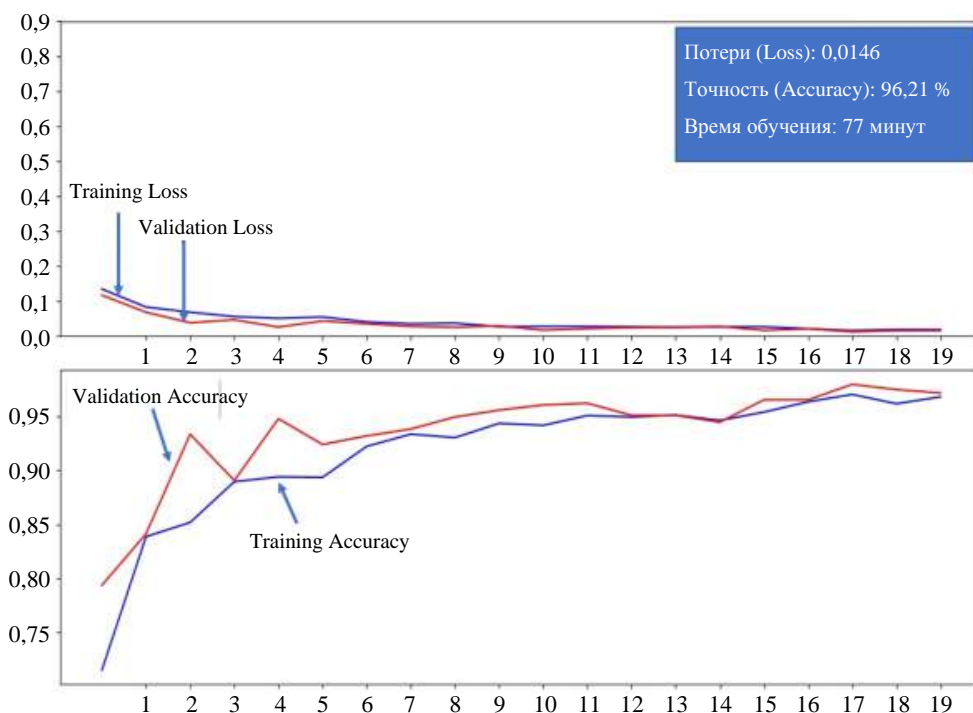


Рис. 4. Графики зависимости точности и потерь от эпохи для сети ResNet101

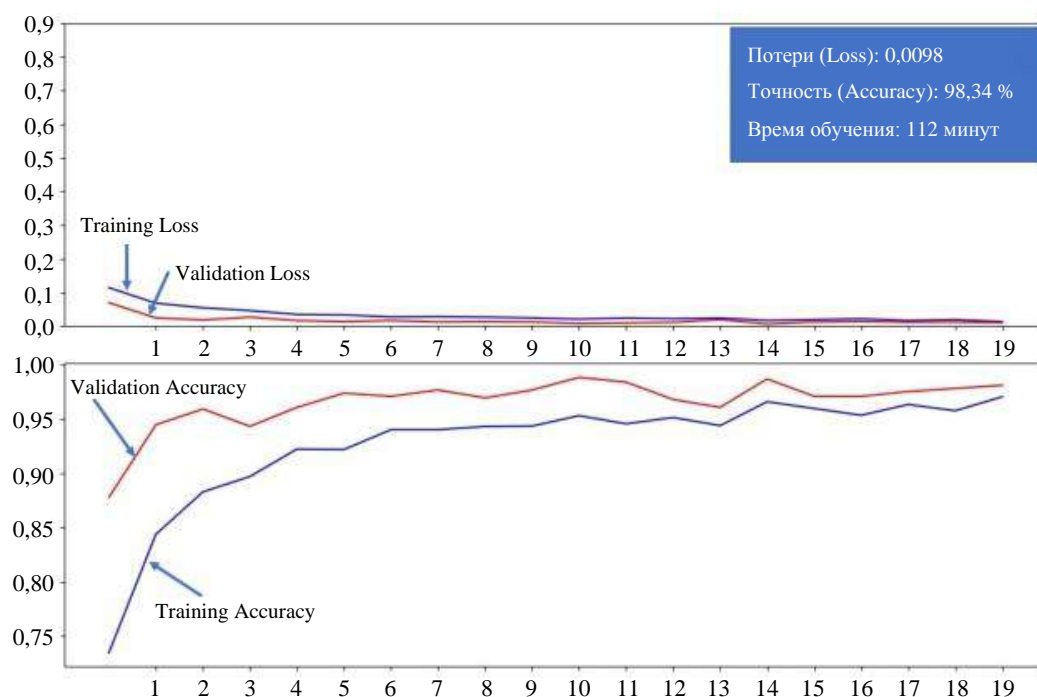


Рис. 5. График зависимости точности и потерь от эпохи для сети ResNet152

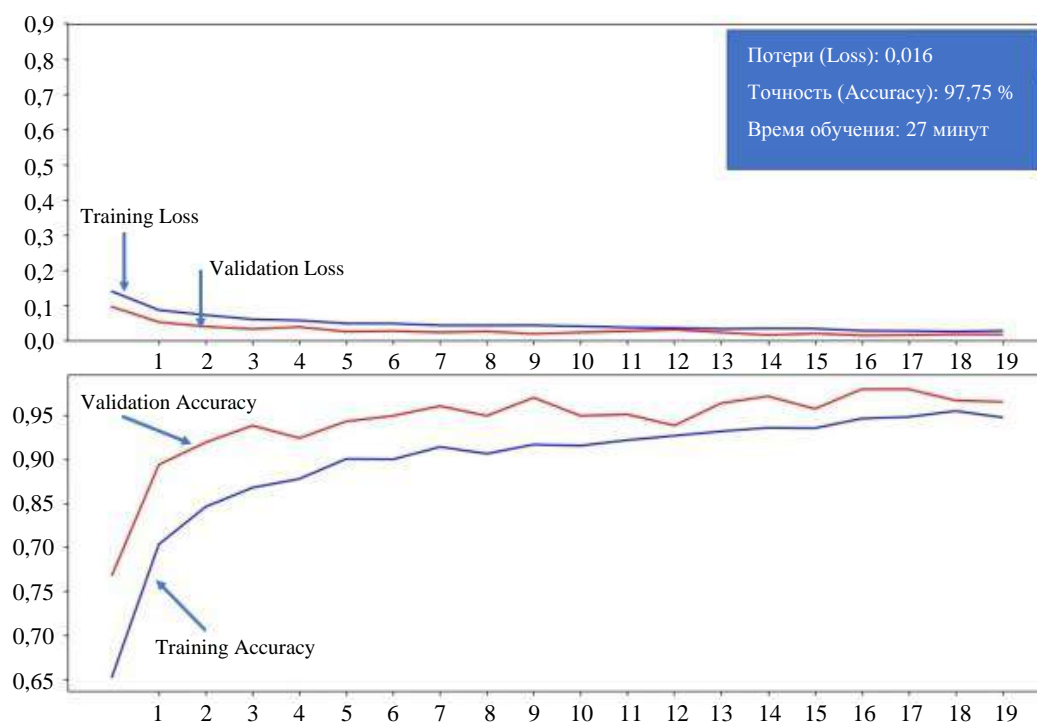


Рис. 6. График зависимости точности и потерь от эпохи для сети GoogleNet



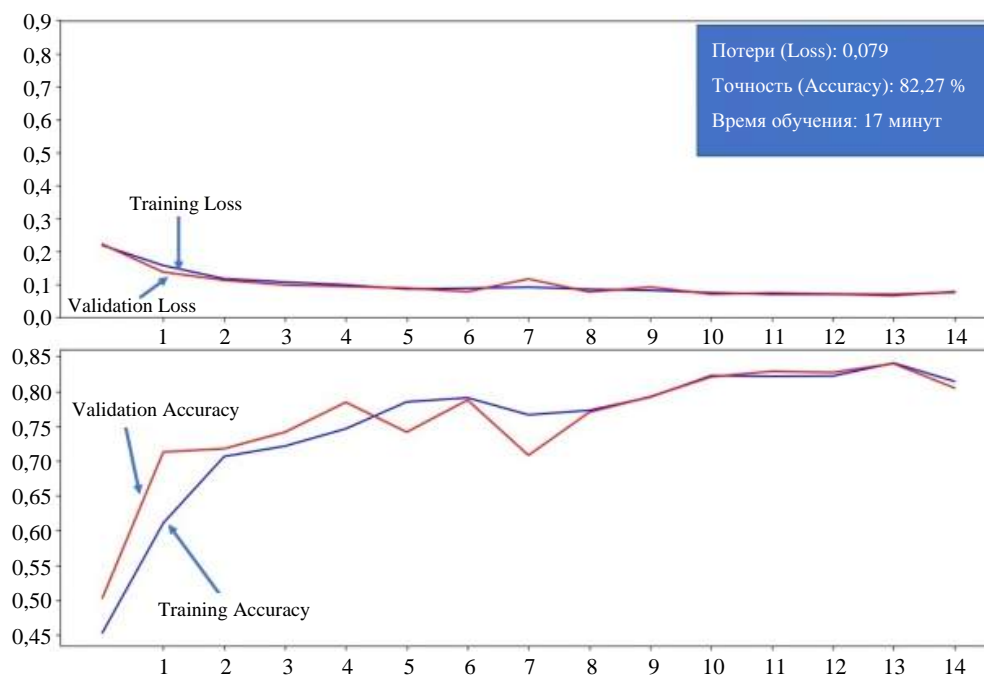


Рис. 7. График зависимости точности и потерь от эпохи для сети AlexNet

Анализ результатов экспериментов по дообучению остаточных сетей *ResNet18*, *ResNet101*, *ResNet152*, *GoogleNet*, *AlexNet* позволяет сделать следующие выводы:

1. *AlexNet* показала худший результат по точности, хотя обучение на этой сети выполнялось за наименьшее время среди представленных сетей. Но именно самая низкая, относительно других сетей, точность делает её непригодной для промышленного использования.

2. Самой высокой точностью из рассмотренных обладает сеть *ResNet152*, но для её обучения необходима более высокая вычислительная мощность и заметно больше времени, чем для остальных сетей. В целом при работе с семейством сетей *ResNet* была выявлена закономерность: чем меньше слоёв в остаточной сети *ResNet*, тем ниже её точность и больше потерь, но выше скорость обучения. Поскольку для задач практического распознавания существенно большее значение имеет точность, а не время "предсказания", то сеть *ResNet152* среди семейства сетей *ResNet* является наиболее предпочтительной основой для трансферного обучения.

3. Сеть *GoogleNet* показала неплохой результат. Её точность всего лишь на 1 % ниже, чем у *ResNet152*, зато время обучения существенно меньше. Сеть *AlexNet* "обгоняет" сеть *GoogleNet* по показателю времени, однако значительно отстает по точности. С практической точки зрения это означает, что именно сеть *GoogleNet* наилучшим образом подходит для задачи разработки прототипа рабочего места инспектора качества. Результат трансферного обучения сети *GoogleNet* на датасетах можно использовать для

классификации, то есть для распознавания инспектируемого образца.

Для выполнения трансферного обучения сети *GoogleNet* были созданы датасеты *train*, *val* и *test*, каждый из которых содержал по одному комплекту для каждого из 6 классифицируемых объектов: *Raspberry Pi B4*, *Raspberry Pi B3-Plus*, *Raspberry Pi B2*, *Banana Pi BPI-M5*, *Banana BPI-W2* и *ESP-8266*. Каждый комплект датасетов содержал изображения в формате *JPG*: комплекты датасета *train* содержали по 900—1200 изображений, датасета *val* — по 300—400 изображений, датасета *test* — по 100—150 изображений. Процедура трансферного обучения (ретренинга) сети выполнялась с использованием библиотек машинного обучения *Tensor Flow* и *PyTorch*. В качестве результата были получены файлы архива ретренированной сети *checkpoint.pth.tar*. Формат архива *checkpoint.pth.tar* позволяет эффективно решать задачи классификации в программах искусственного интеллекта, но для решения задач распознавания объектов средствами компьютерного зрения необходимо привести результаты тренинга нейронной сети к какому-то универсальному формату. Для работы со сторонними приложениями, которые используют функциональные модули искусственного интеллекта, работающие с задачами распознавания объектов, был выбран широко распространенный формат *ONNX*. Это открытый стандарт для конвертации моделей машинного обучения из разных фреймворков в единый формат, а также для обмена моделями между фреймворками.

На рис. 8 представлена реализованная схема трансферного обучения и сохранения результатов для их дальнейшего использования.

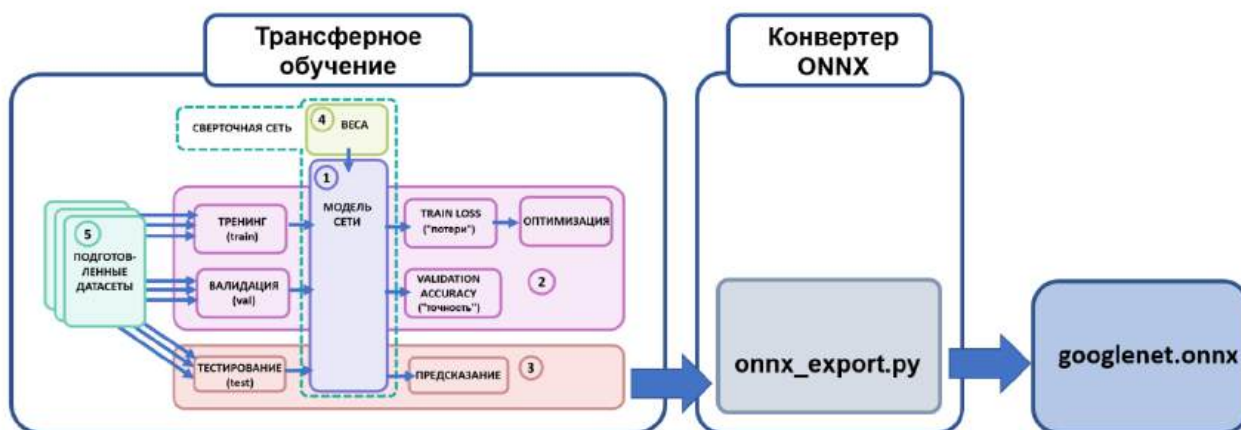


Рис. 8. Схема процесса получения ретренированной модели сети GoogleNet в формате ONNX

Дообучение предобученной нейронной сети (см. рис. 2) было дополнено конвертацией результата в формат *ONNX* и сохранением его в виде архива *googlenet.onnx*. За счет использования программного модуля *onnx\_export.py* получение результирующего архива *checkpoint.pth.tar* выполняется сразу после процесса трансферного обучения. Результат конвертирования применяется далее непосредственно в составе прототипа рабочего места при выполнении процедуры распознавания объектов в режиме реального времени (см. "Предобученная DNN" на рис. 1).

Процесс получения ретренированной модели выбранной сети заканчивается конвертацией сети в файл в формате *ONNX*, и именно этот файл может в дальнейшем быть размещен в составе программного обеспечения системы компьютерного зрения и использоваться как своеобразная настроенная база знаний для выполнения процедуры распознавания входного видеопотока. На рис. 9 представлена схема использования архива *googlenet.onnx* в составе рабочего места инспектора при распознавании и классификации потока изображений разнообразных устройств микросхемотехники.

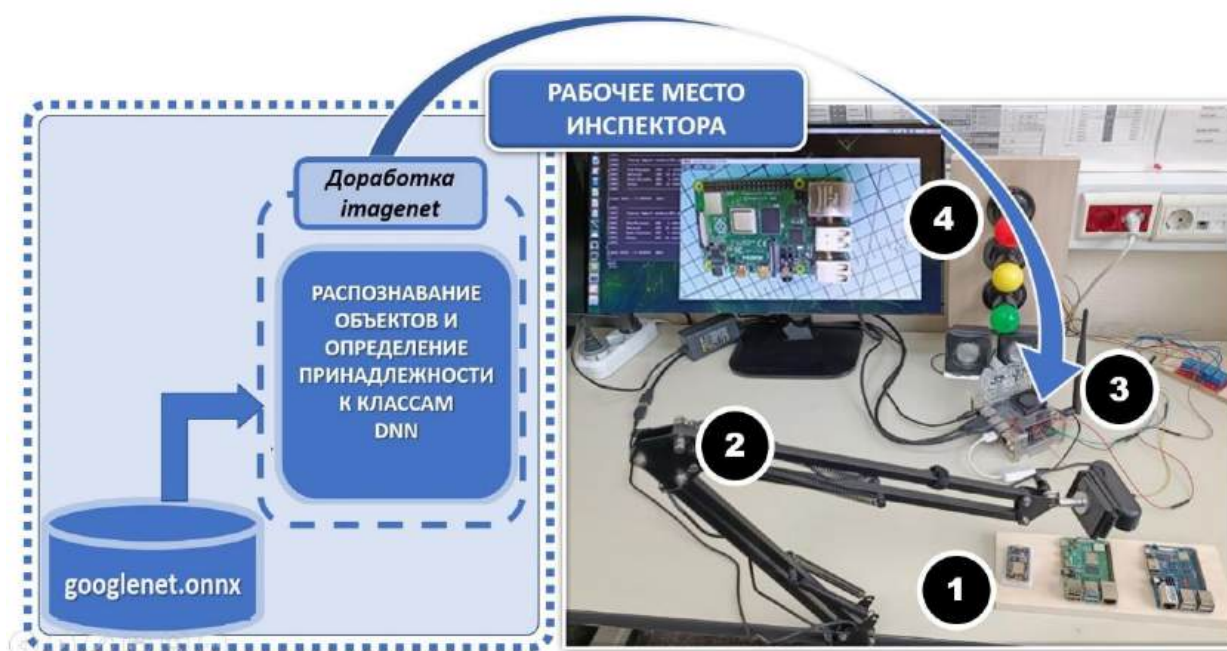


Рис. 9. Реализация процедуры распознавания в прототипе рабочего места инспектора

- 1 — имитация потока изделий типа SoC; 2 — Web-камера;  
3 — NVIDIA Jetson Nano с установленным комплектом программного обеспечения распознавания и классификации изделий из потока; 4 — комплекс средств извещения о распознанном объекте (монитор, система аудиооповещения, колонка световых индикаторов принадлежности к классу)

### Заключение

Применение технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта существенно рационализирует процессы визуального контроля качества выполнения сборочных операций. Использование при визуальной инспекции в качестве процедуры распознавания в системе компьютерного зрения классификации на основе тренинга сетей *DNN* позволяет достигать требуемых показателей точности распознавания. Применение готовых моделей нейронных сетей, допускающих выполнение трансферного обучения на дополнительных датасетах пользователя, приводит к отказу от разработки новых моделей *DNN*-сетей. Практическая реализуемость предлагаемых методик искусственного интеллекта и компьютерного зрения при разработке прототипа рабочего места инспектора в условиях отечественного промышленного дискретного производства основана на использовании только открытого программного обеспечения и приме-

нении неподсанкционного аппаратного обеспечения.

### Литература

1. Краюшкин В. А., Лешихина И. Е., Пирогова М. А. Применение технологий дополненной реальности и искусственного интеллекта для автоматизации процессов визуального контроля качества выполнения сборочных операций. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2023. № 1. С. 3—9.
2. Шолле Ф. Глубокое обучение на *Python*. 2-е межд. издание. — Изд-во Питер, 2023. — 576 с.
3. Jindong Wang, Yiqiang Chen. Introduction to Transfer Learning: Algorithms and Practice. — Springer, 2023.
4. Ферлитш Э. Шаблоны и практика глубокого обучения / пер. с англ. Логунова А. В. — М.: ДМК Пресс, 2022. — 538 с.
5. Transfer Learning: как быстро обучить нейросеть на своих данных. Структурные компоненты [Электронный ресурс]. URL: <https://hsto.org/r/w1560/webt/tf/xp/2o/tfxp2on4o-rxj6hnt4dij7u8vkl.jpeg> (дата обращения: 19.10.2023).

## THE PRACTICE OF USING COMPUTER VISION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO AUTOMATE THE PROCESSES OF VISUAL QUALITY CONTROL OF ASSEMBLY OPERATIONS

M. A. Pirogova, I. E. Leshikhina, E. I. Shvedov  
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

V. A. Krayushkin  
LLC "PTS", Moscow, Russia

*The possibilities of using computer vision and artificial intelligence technologies to increase the productivity and efficiency of quality control of assembly operations are considered. Computer vision and artificial intelligence technologies were used to develop a prototype of a quality inspector's workplace; their specifics and features of practical application were analyzed.*

**Keywords:** artificial intelligence, computer vision, datasets, classification, digital transformation.

Пирогова Марина Аркадьевна, доцент.

E-mail: PirogovaMA@mpei.ru

Лешихина Ирина Евгеньевна, доцент.

E-mail: liy56@mail.ru

Шведов Евгений Игоревич, студент.

E-mail: Shvedov.zheka@yandex.ru

Краюшкин Владимир Анатольевич, руководитель проектов.

E-mail: vkray@pts-russia.com

Статья поступила в редакцию 18 октября 2023 г.

УДК 681.518.2

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_4\_20

EDN: RQUYTB

## МЕЖДУНАРОДНАЯ КВАНТОВО-КОМПЬЮТЕРНАЯ ГОНКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ЧАСТЬ 2 (Обзор)

П. А. Правильщиков, канд. техн. наук

ФГБУ "Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН", Москва, Россия

*Приводится обзор современного состояния разработок квантовых компьютеров, квантовых алгоритмов и языков квантового программирования в странах Азии. Отмечено, что в настоящее время в квантово-компьютерной гонке лидируют Китай и США. Подчеркивается, что разработка квантовых алгоритмов не менее важна, чем разработка "железа" квантовых компьютеров.*

**Ключевые слова:** квантовые компьютеры, квантовые алгоритмы, квантово-компьютерная гонка, квантовые информационные технологии, языки квантового программирования, квантовое превосходство, кубиты, кутриты, куквадриты, куниты.

В первой части обзора, опубликованной в [1], проанализировано развитие квантовых компьютеров (КК) и квантовых алгоритмов в Северной Америке. Данная часть обзора посвящена рассмотрению разработок квантовых компьютеров в Азии — Китае, Японии, Индии, Южной Корее, Иране, Сингапуре. Однако вначале приведем еще одну разработку в США, информация о которой в открытых источниках появилась недавно и поэтому не успела войти в первую часть обзора. Это кремниевый фотонный КК, разрабатываемый американской компанией *PsiQuantum* [2]. Компания основана в 2016 году четырьмя физиками из Бристольского университета (Великобритания) на основе предложенной ими технологии. Кремниевые полупроводниковые технологии, применяемые в микроэлектронике для производства различных микросхем (в частности, для КМОП микросхем), *PsiQuantum* будет использовать для производства своих фотонных КК на заводе компании *SkyWater*, но не в микроэлектронике, а в микрофотонике (для микролазеров, микросветоводов, микросветоделителей, микросветоотражателей, микрофотоприёмников и т. п.)<sup>1</sup>. На это основатели *PsiQuantum* получили венчурное финансирование в размере 215 млн долл. [3] и намерены использовать эти деньги на реализацию разработанной ими за последние пять лет технологии. Повторим, что после завершения этапа создания и тестирования прототипа КК его производством займётся завод компании *SkyWater*. Этот завод десятилетиями обслуживал заказы спецслужб и военные заказы США, поэтому соответствует всем требованиям защиты от уте-

чек [4]. *SkyWater* сотрудничает с ними по ряду перспективных проектов, так как КК входят в сферу интересов национальной безопасности США<sup>2</sup>. *PsiQuantum* использует фотоны в процессорах КК в качестве бегущих кубитов (см. [1]). Основатели *PsiQuantum* заявили о планах компании создать в 2025 году сверхмощный коммерческий КК на основе кремниевой фотоники<sup>3</sup> [4]. Дж. О'Брайен, один из основателей и исполнительный директор *PsiQuantum*, говорит: "Сейчас мы находимся на том этапе, когда преодолели критические препятствия на пути к созданию КК с миллионом кубитов — масштаба, необходимого для всех известных полезных коммерческих приложений" [4]. Одно из таких препятствий заключалось во внедрении высокопроизводительных компонент в существующий производственный процесс. Например, используется более эффективный волновод для направления фотонов внутри чипа и новые полупроводниковые лазеры, тип и частота излучения которых не указаны. Также неизвестно, используются ли сверхбыстрые фотонные переключатели, работающие на кремниевых наноструктурах [5].

Преимуществами квантового компьютера *PsiQuantum* по сравнению с другими типами КК являются низкий уровень шума, работа при не

<sup>1</sup> Заметим, что *Intel* использует свои кремниевые полупроводниковые технологии не только для создания классических микросхем (БИС) и микропроцессоров, но и для получения спиновых кубитов, образующих регистр КК *Intel* (см. [1]).

<sup>2</sup> Военные и спецслужбы США заинтересованы в КК, так как квантовые компьютеры могут изменить соотношение сил в бизнесе и кибервойнах. В США считают, что КК имеют большое значение для национальной безопасности, так как КК — технологический эквивалент ядерного оружия [5].

<sup>3</sup> Новым направлением в фотонике является также оптоинформатика — область науки и техники, связанная с исследованием, созданием и эксплуатацией новых материалов, технологий и устройств для передачи, приёма, обработки, хранения и отображения информации на основе оптических технологий. Таким образом, современную информатику можно разделить на классическую, квантовую и оптоинформатику [1, 6–8].

слишком низких температурах и отсутствие "атомного" производства. Напомним, что недавно в разработках КК доминировали технологии, включающие действия с трансмонами, ионами или сверхохлаждёнными нейтральными атомами (см. [1]). В отличие от них, технология *PsiQuantum* опирается на квантовые свойства фотонов, а не на электронику, использование которой в большинстве случаев получает поддержку в отрасли. *PsiQuantum* финансируется влиятельными инвесторами, такими как *Microsoft* (фонд M12), *Baillie Gifford* (один из первых инвесторов *Tesla*), *Blackbird Ventures* и *Temasek* [3, 4]. Компания собрала более 500 млн долл. инвестиций и намерена создать первый в мире отказоустойчивый КК благодаря исследованиям в области оптических квантовых вычислений, которые О'Брайен проводил в Бристольском университете в течение 12 лет. О'Брайен утверждает, что большие модульные системы могут быть построены только с помощью фотоники. Он говорит: "Наша система Q-1 решает проблемы масштабирования, общие для всех подходов к квантовым вычислениям: технологичность, мощность охлаждения, возможности подключения и задачи управляющей электроники" [4]. Его соучредитель П. Шэдболт противопоставил *PsiQuantum* конкурентам, которые создали КК меньшего размера с использованием нескольких десятков кубитов. По его мнению, они "могут демонстрировать "квантовое превосходство" путем выполнения специфических вычислений, но не могут быть масштабированы до более мощных и гибких машин" [4]. И хотя *PsiQuantum* планирует использовать КК Q-1 с миллионом физических кубитов, большинство из них пока что будет использоваться для исправления ошибок, а не для реальной обработки данных (значимые сигналы должны быть извлечены из "шума" любой квантовой системы) [4].

**КК в Китае.** Считается, что Китайская народная республика (КНР) на один или два шага отстаёт от США и Канады в области квантовых вычислений. На самом деле в области исследований и разработок квантовых компьютеров Китай медленно и незаметно опережает США и другие страны, о чём в последнее время не перестают говорить все, кто знаком с ситуацией [9, 10]. И дело даже не в огромных тратах на исследования (начиная с 2019 года КНР вложили 15 млрд долл. в разработки КК), а в постоянном увеличении научного потенциала китайских учёных.

В КНР был создан фотонный КК *Jiuzhang 1.0*, который в 2020 году достиг квантового превосходства<sup>4</sup>. КК *Jiuzhang 1.0* является специализированным вычислителем, решающим за 200 секунд одну физическую задачу Гауссов-

ской выборки бозонов (ГВБ).<sup>5</sup> По оценкам математиков самому мощному на то время суперкомпьютеру потребовалось бы для решения этой задачи около 22,5 миллиардов лет. Это экспериментально доказанный пример квантового превосходства [11–15].

Некоторые отечественные физики подчёркивают, что китайский КК *Jiuzhang 1.0* — это не полноценный квантовый компьютер [16], а всего лишь симулятор, предназначенный только для демонстрации квантового превосходства. Другими словами, КК *Jiuzhang 1.0* делает на пубlike то, чего никогда не сможет сделать суперкомпьютер, пусть даже с миллионами ядер. Здесь можно несколько разочаровать авторов таких высказываний. Недавно появилось сообщение, что КК *Jiuzhang 1.0* смог обработать ориентированные на задачи искусственного интеллекта (ИИ) алгоритмы в 180 млн раз быстрее самого мощного суперкомпьютера. Это ещё не тотальное преимущество квантовых вычислений, но очевидное приближение к их внедрению [17]. В этом случае КК *Jiuzhang 1.0* можно назвать проблемно-ориентированным КК. Китайские учёные сообщили, что КК *Jiuzhang 1.0* обработал 200 тысяч выборок с использованием моделирования случайного поиска и отжига (поиска минимумов) менее чем за одну секунду. Классический суперкомпьютер только на каждую выборку потратил бы 700 секунд, что в сумме составило бы пять лет непрерывных расчётов. По словам китайских исследователей, проблемы, решаемые их КК, могут быть применены также к интеллектуальному анализу данных, обработке биологической информации, сетевому анализу и исследованиям в области химического моделирования [17]. Но здесь следует сделать важное замечание. И в КК Q-1 от *PsiQuantum*, и в КК *Jiuzhang 1.0* используются бегущие кубиты, только КК Q-1 является программируемым и его можно адаптировать под решение большого числа различных задач, тогда как КК *Jiuzhang 1.0* является специализированным проблемно-ориентированным КК, поскольку может решить меньший круг задач, но очень быстро.

Фотонный КК *Jiuzhang 1.0* решает, по сути, задачу Гауссовской выборки фотонов. Он представляет собой оптическую сеть, образующую некоторый лабиринт  $\Lambda$ , построенный из светоделителей и зеркал, которые дают фотонам множество вариантов пути для прохождения, прежде чем фотоны достигнут различных выходов из  $\Lambda$ . Функционирование КК *Jiuzhang 1.0*, представляющего лабиринт  $\Lambda$ , можно описать следующим образом [9, 18–24]. Лабиринт  $\Lambda$  внутри КК *Jiuzhang 1.0* имеет 100 входов и 100

<sup>4</sup> В связи с гонкой за квантовым превосходством один из руководителей разработки КК *Jiuzhang* профессор Лю Чаоян отметил, что "создание КК — это гонка не между странами, а между человечеством и природой" [12].

<sup>5</sup> Напомним, что все элементарные частицы делятся на две группы: фермионы — частицы вещества (материи) и бозоны — переносчики взаимодействия (примерами бозонов являются фотоны, глюоны, бозоны Хиггса и не обнаруженные пока гравитоны).



выходов для фотонов и построен с использованием 300 светоделителей и 75 зеркал (заметим, что  $\phi = 4 \times 10^{84}$ , где  $\phi$  — число фотонов в наблюдаемой Вселенной). В качестве светоделителей используются призмы из кристаллов титанилфосфата калия. На начальном этапе луч лазера расщепляется на 25 лучей и попадает на 25 сдвоенных в одном корпусе кристаллов титанилфосфата калия. После попадания в каждый кристалл из него в противоположных направлениях вылетают два фотона. Затем фотоны после фотоделителей попадают на 100 входов лабиринта  $\Lambda$ . Каждый вход ведёт фотоны по маршруту из 300 призм и 75 зеркал. Фотоны отправляются в сеть параллельно и, оказавшись внутри  $\Lambda$ , разделяются светоделителями. Огромное преимущество фотонов заключается в их высокой подвижности и, оказавшись в  $\Lambda$ , они могут двигаться по разным путям. В соответствии с законами квантовой механики, фотоны проходят все возможные пути одновременно [20, 21]. Это можно называть суперпозицией. Расщепленные фотоны продолжают движение по сети, встречая зеркала и другие светоделители. Примечательно, что, если два фотона сталкиваются с одним и тем же разделителем одновременно, оба неразделенных фотона будут следовать по одному из путей от разделителя. Результатом движения фотонов в лабиринте  $\Lambda$ , то есть результатом вычислений, будет некоторое число, которое получают путём измерения числа фотонов, попадающих на определённый выход оптической сети. Подчеркнём, что существует много важных практических задач, решение которых сводится к движению в лабиринте, и лабиринт  $\Lambda$  является моделью таких задач [22]. Примерами могут служить алгоритмы с возвратом назад. К ним относятся, например, алгоритмы решения булевых уравнений, задачи построения тестов для цифровых устройств, верификации цифровых схем [22–24].

Еще одним успехом китайской науки стало создание в 2021 году фотонного КК *Jiuzhang 2.0* с 113 кубитами. Заявленная производительность — решение той же задачи ГВБ за 1 мс (суперкомпьютер решит её за 30 трлн лет). КК *Jiuzhang 2.0*, как и КК *Jiuzhang 1.0*, решает задачу, когда система имитирует поведение фотонов при прохождении через лабиринт кристаллов и зеркал. Теперь специалисты в КНР пытаются усовершенствовать КК *Jiuzhang 2.0*, преобразовав его в проблемно-ориентированный КК для решения задачи криптоанализа [17, 19]. Удалось ли им решить эту задачу или нет, пока неизвестно, но уже сегодня спецслужбы собирают из Интернета зашифрованные данные, которые в будущем надеются расшифровать [25]. В 2023 году появились сообщения о создании под руководством китайского физика Пань Цзяньвэя квантового компьютера *Jiuzhang 3.0* [26], который оперирует уже с 255 бегущими кубитами. Сообщается, что КК *Jiuzhang 3.0* в

миллион раз быстрее *Jiuzhang 2.0* и, по мнению экспертов, позволяет производить вычисления сложнейших образцов задачи ГВБ за одну микросекунду. Для решения этой задачи самому быстрому на сегодня суперкомпьютеру *Frontier* из Топ500 потребуется более 20 млрд лет [26]. Можно предположить, что с учётом числа  $\phi$  у китайских фотонных КК большие перспективы, и Пань Цзяньвэй продолжит линейку своих КК (см. таблицу ниже) по крайней мере до 1000 кубитов, если этому не помешают введённые в США запреты на экспорт в КНР высокотехнологичных товаров [25].

Название фотонного КК	Число бегущих кубитов-фотонов	Год презентации
<i>Jiuzhang 1.0</i>	76	2020
<i>Jiuzhang 2.0</i>	113	2021
<i>Jiuzhang 3.0</i>	255	2023
<i>Jiuzhang 4.0</i>	?	?

Приведённые фотонные КК пока не являются программируемыми. Скорее всего, эти КК будут использоваться в гибридных квантово-классических вычислениях, в которых китайские математики уже добились определённых успехов [25]. Сам же Пань Цзяньвэй считает, что квантовые вычислители "в принципе обладают потенциалом сверхбыстрых параллельных вычислений. Ожидается, что они смогут выполнять более серьёзные вычислительные процессы по сравнению с традиционными компьютерами на основе специализированных алгоритмов в таких областях, как расшифровка кодов, оптимизация "больших данных", прогнозирование погоды, разработка новых материалов и анализ свойств лекарственных препаратов" [26].

Ещё об одном прорыве в области квантовых вычислений в КНР было сообщено летом 2021 года. Китайские учёные и инженеры провели успешный эксперимент с китайским программируемым 56-кубитовым КК *Zuchongzhi* [19], регистр которого построен с использованием трансмонов. При расчёте классической задачи генерации случайной строки, когда с начальным состоянием КК выполняются случайные, но известные последовательности операций с последующим сравнением теоретических и полученных на КК данных, китайский КК *Zuchongzhi* оказался на два-три порядка быстрее 53-кубитового КК *Sycamore* (сегодня он занимает 7-е место в списке Топ500) компании *Google* [19]. Ранее КК *Sycamore* с регистром на трансмонах решал ту же задачу, что и КК *Zuchongzhi*, поэтому сравнение американских и китайских КК вполне корректно. Вышеупомянутую задачу генерации случайной строки решал и классический суперкомпьютер *Summit* фирмы *IBM*. Специалисты *IBM* не признали факт квантового превосходства КК *Sycamore* над *Summit*, так как по другому алгоритму *Summit* решал эту задачу довольно быстро.

В октябре 2021 года китайские специалисты сообщили о запуске 66-кубитового КК *Zuchongzhi-2* [19]. Его десять дополнительных кубитов резко ускорили решение той же задачи. По словам разработчиков, система *Zuchongzhi-2* работала в миллион раз быстрее *Sycamore* и в 10 млн раз быстрее самого быстрого классического суперкомпьютера [19].

Теоретически, квантовые компьютеры, подобные китайским КК *Zuchongzhi*, могут программироваться на относительно широкий круг задач, то есть являться проблемно-ориентированными КК общего назначения. Этот круг задач связан с моделированием случайных состояний среды в области физики и химии. Также КК могут применяться для поиска новых лекарств или для моделирования движения гиперзвуковых объектов. Но прежде, чем решать подобные задачи, необходимо уменьшить количество ошибок КК *Zuchongzhi* и КК *Zuchongzhi-2*, повысив тем самым вероятность вычисления правильного ответа, и создать соответствующие квантовые алгоритмы. Подчеркнём, что в настоящее время в квантовых информационных технологиях (ИТ) существует два основных типа алгоритмов:

1. Крайне важные алгоритмы, помогающие преодолеть ограничения современных "шумящих" КК. Они могут использоваться в КК среднего масштаба, которые создают значительный шум, вызывающий ошибки. Джон Прескилл назвал такие квантовые компьютеры *NISQ* (*Noisy Intermediate State Quantum*) [28, 29]. Поиск алгоритмов, позволяющих сократить ошибки, является такой же активной областью исследований, как и создание квантового "железа"<sup>6</sup>.

2. Прикладные алгоритмы решения задач конечных потребителей. Эти алгоритмы можно классифицировать в зависимости от области их использования. Условно их разделяют на три класса: 1) алгоритмы разработки лекарств и алгоритмы моделирования физических систем, например в молекулярной химии; 2) алгоритмы квантового машинного обучения, в частности, алгоритмы обучения в области финансов; 3) алгоритмы, применяемые в технике для проектирования, верификации и тестового диагностирования технических изделий (пример алгоритма для верификации цифровых схем см. в [23]), а также для автоматической генерации программ. Все эти задачи и алгоритмы для их решения сложны, и в ближайшие годы китайским учё-

ным нужно ещё много потрудиться, чтобы подготовить свои КК для реализации практически полезных вычислений.

Говоря о КК *Zuchongzhi* и *Zuchongzhi-2*, следует упомянуть о перспективах использования трансмонов в квантовых компьютерах. Эти перспективы связаны с разработками высокотемпературных сверхпроводников. В июле 2023 года появилось сообщение о том, что в Южной Корее получено сверхпроводящее вещество *LK-99* — обработанный свинцовый апатит с некоторыми специальными добавками меди [30, 31]. *LK-99* имеет свойства сверхпроводника при температурах до +127 °C и при нормальном атмосферном давлении. Если информация подтвердится, то новый сверхпроводник может изменить мир. Тогда трансмоны в регистре КК смогут работать без глубокого охлаждения. В Республике Корея считают, что их новая разработка станет вехой, открывающей новую эру для человечества.

В Физическом институте имени П. Н. Лебедева Российской Академии Наук (ФИАН) встретили сообщение о новом сверхпроводнике с известной долей скептицизма [31]. Сотрудникам ФИАН удалось пока создать сверхпроводник с критической температурой сверхпроводящего перехода минус 20 °C. Это рекорд среди всех достоверных результатов. Недостаток такого сверхпроводника в том, что для синтеза материала и осуществления сверхпроводимости необходимо сверхвысокое давление. В настоящее время в ФИАН анализируют представленные в [30] результаты по *LK-99*. Планируется их экспериментальная и теоретическая проверка. Однако вызывает сомнение, что специалисты из Южной Кореи поделятся технологическими секретами с ФИАН.

Вице-президент *IBM* Дж. Гамбетта надеется, что в университетах США найдут способ повысить температуру, при которой трансмоны смогут работать с приемлемой величиной ошибок. На эти цели он выделяет университетам 100 млн долл. (см. [1]). Сверхпроводники, работающие при температуре 20 °C, помогли бы *IBM*, *Google* и *Rigetti* создать квантовые суперкомпьютеры без холодильников, уменьшив их стоимость. Они также помогли бы экономить потребление энергии суперкомпьютерами. Компании смогли бы создать также персональные десктопы и ноутбуки с большим числом *L* кубитов в регистре КК. Повышение температуры работы сверхпроводников с приемлемым уровнем ошибок хотя бы до температуры жидкого азота (–195,75 °C) станет большим достижением и позволит удешевить стоимость холодильников для КК.

В КНР сегодня продаются квантовые десктопы. Три десктопа — *Gemini Mini* и *Gemini* размерами с системный блок ПК и *Triangulum*, очертаниями и размерами очень напоминающий принтер, — создал стартап *Shenzhen SpinQ Technology* [32, 33]. Для решения сложных задач эти десктопы непригодны из-за малого чис-

<sup>6</sup> КК обладают потенциалом преобразования всей ВТ, но только в том случае, если удастся справиться с ошибками, присущими этим шумным и высокочувствительным системам, которые работают на границах классической физики. Обработка ошибок — непростая задача, нужно предвидеть и исправлять эти ошибки на каждом этапе проектирования системы. В *IBM*, например, обработку ошибок разделяют на три основные части, каждая из которых имеет свои собственные аспекты исследований, разработок и алгоритмов: подавление ошибок, смягчение последствий ошибок и исправление ошибок [27].

ла кубитов в регистре, их используют только для обучения студентов. *Gemini Mini* и *Gemini* умеют работать с двумя кубитами, а *Triangulum* — с тремя<sup>7</sup>. Эти десктопы основаны на явлениях ядерного магнитного резонанса (ЯМР), поэтому их называют ЯМР-компьютерами. Подобные КК выпускают и в других странах.

В сентябре 2023 года китайская компания *Origin Quantum*, производитель КК из Хэфэя, пообещала к 2025 году превзойти отметку в 1000 кубитов.

Успехами в КНР очень обеспокоились в США. Некоторые американские специалисты утверждают, что Китай выигрывает у США квантово-компьютерную гонку [25]. Особенно их тревожит ситуация, которая складывается в области квантовых нейронных сетей и криптографии [25]. В США обеспокоены, что Китай сможет контролировать пароли, кредитные карты, банковские счета и электронные письма американцев. В Китае всё чаще обращаются к квантовым вычислениям для обработки ранее непостижимых объёмов данных. Именно поэтому один из американских специалистов описал гонку за квантовым превосходством как поиск "совершенного оружия" и сравнил усилия по созданию КК с Манхэттенским проектом [25, 34]. Чтобы воспользоваться преимуществами производительности КК, шпионские агентства и спецслужбы уже сохраняют весь доступный поток зашифрованных данных с целью позже расшифровать его и получить доступ к чужим секретам [25]. Дастин Муди, который отвечает за стандарты постквантового шифрования в США, утверждает, что "противники...копируют наши зашифрованные данные и просто хранят их". Поэтому в 2022 году президент США поручил к 2035 году перевести всю стратегически важную информацию в новые протоколы постквантового шифрования, построенные на основе квантовой механики [25, 34].

По мнению американцев, цель спецслужб КНР — взломать шифрование криптографическим алгоритмом *RSA*, используемое для защиты большей части информации, хранящейся в Интернете. В [25] утверждается, что в США давно опасались возможности КК полностью разрушить шифрование, которое защищает много мировых данных. Но большинство считало, что угроза наступит, по крайней мере, через десять лет. Однако в декабре 2022 года в США вышла статья, написанная 24 исследователями, в которой утверждается, что в Китае стали использовать гибридные квантово-классические системы и разработали метод взлома документов, зашифрованных алгоритмом *RSA*, с использованием именно гибридных систем [25]. Метод взлома, разработанный в КНР, представ-

ляет собой модификацию алгоритма, разработанного математиком П. Шором [35]. Модификация состоит в том, что некоторые наиболее трудоёмкие процессы перенесены в квантовую систему, а более простые выполняет классический компьютер. Подробнее такой гибридный подход излагается в [36].

**КК в Японии.** В Японии, которую сегодня иногда называют страной восходящего квантового превосходства, предпринимаются большие усилия по развитию КК и квантовых вычислений [37]. При этом не следует забывать, что японский суперкомпьютер *Fugaku* занимает вторую позицию в мировом рейтинге Top500 суперкомпьютеров после *Frontier* от *IBM* (совсем недавно он занимал первое место). Эксплуатация *Fugaku* в Японии показала, что наращивание мощности битовых суперкомпьютеров за счет увеличения числа процессоров уже исчерпано. *Fugaku* уступает КК в решении ряда задач, требующих обработки большого массива данных.

Японские компании сильно отстали от США и Китая в разработке КК. Несколько лет назад правительство Японии предприняло ряд мер организационного порядка и немного помогло с финансированием, чтобы процесс начал набирать силу. Первый японский цифровой КК создан в 2023 году [38]. Это совместная разработка Института естественных наук *Riken* и компании *Fujitsu*. Японский КК может оперировать 64 кубитами, что намного больше, чем в КК *Quantum System One* производства *IBM* (см. [1]). Кубиты в регистре японского КК являются трансмонами. В 2025 году *Riken* и *Fujitsu* обещают запустить 100-кубитовый КК, а ещё через год — 1000-кубитовый [38, 39]. В марте 2023 года *Riken* и *Fujitsu* презентовали также аналоговый КК местного производства [38, 39]. Он называется *Quantum Innovation Initiative Consortium (QIIC)* и базируется на технологии цифрового аннигилятора (*Digital Annealer*) от *Fujitsu*. Это устройство имитирует процесс аннигиляции — перехода физической системы из возбуждённого состояния в основное с минимальной энергией. Таким образом, КК *QIIC* способен решать сложные оптимизационные задачи, такие как поиск кратчайшего пути или распределение ресурсов. Японский КК *QIIC* во многих аспектах напоминает канадский КК *Advantage* компании *D-wave*, у которого регистр состоит из 5000 кубитов (см. [1]). Регистр КК *QIIC* содержит 8192 кубита и может достигать скорости, эквивалентной 10 петафлопс классического суперкомпьютера. Кроме того, он обладает высокой стабильностью и надёжностью и не требует сверхнизких температур или высокого вакуума для работы. КК *QIIC* доступен для использования внешними пользователями через облачный сервис. Среди первых пользователей КК *QIIC* такие гиганты, как *Toyota*, *Sony*, *Toshiba*.

<sup>7</sup> В конце 2022 года базовая модель десктопа стоила около 590 тыс. руб. [32, 33]. Сегодня цены на квантовые десктопы выросли приблизительно в 8 раз, но при этом ни о каком восьмикратном росте производительности никто не говорит — это все те же два или три кубита.

Ранее в Японии возможность воспользоваться квантовыми вычислениями на КК *IBM Quantum System One* предоставляла *IBM* через *IBM Japan Ltd.* Кроме этого, в Нью-Йорке *IBM Corp.* имеет более тридцати КК, которые выполняют большинство заказов не только для клиентов из США. Более 140 компаний и университетов по всему миру получают к ним доступ с помощью облачных технологий. Многие японские компании и университеты используют нью-йоркские КК от *IBM*, но они вынуждены конкурировать с клиентами по всему миру за время работы на этих КК. В ноябре 2023 года появились сообщения о том, что в Японии на базе Токийского университета запустили мощнейший в стране "практический" квантовый компьютер<sup>8</sup> от *IBM* — 127-кубитовую платформу под названием *IBM Quantum Eagle*. От японских партнёров *IBM* рассчитывает получить идеи практического использования нового класса вычислительных устройств. Эти КК обещают невообразимую мощь в обработке данных, но как это будет выглядеть на практике, никто не знает. КК *IBM Quantum Eagle* будут использовать около двух десятков учебных заведений страны и компаний с целью обучить КК поиску новых материалов и лекарств, работе с финансами, решению вопросов в области физики, химии и социологии. Затраты на подобные исследования огромны, но благотворительности в этом нет — *IBM* нужны квантовые алгоритмы. Первопроходцы получают всё, и *IBM* ожидает от этого впечатляющую отдачу.

Проект новой Национальной стратегии Японии определяет квантовые вычисления как "ключевые технологии, которые будут лежать в основе будущей конкуренции за превосходство между государствами" [38]. В Японии считают, что использование КК позволяет ускорить создание ИИ, в десять раз ускоряет разработку новых материалов в областях, имеющих решающее значение для декарбонизации (например, батарей для электромобилей), организовать искусственный фотосинтез, продвинуться в геномной инженерии, в моделировании сложных физико-химических и даже социальных процессов. Сфера применения КК расширяется. Поэтому некоторые руководители корпораций и консорциумов говорят о необходимости сотрудничества промышленности и академических кругов для ускорения внедрения квантовых вычислений в практику [37–40]. В планах японских учёных к 2030 году разработать КК с использованием фотонов [40]. По-видимому, в Японии решили конкурировать с КК *PsiQuantum* и китайскими фотонными КК. Новому японскому фотонному

КК не потребуется ультрахолодная среда. Проект выполняют в сотрудничестве с учеными Токийского университета при поддержке *Riken*. В Японии уже разработали высокоэффективный источник сжатого света, который используется для передачи информации в оптических квантовых вычислениях и в каналах квантовой связи. На основе этой технологии и соберут новый КК. Фотонные КК смогут работать при комнатной температуре без дорогостоящих холодильников, которые необходимы для работы квантовых компьютеров, использующих трансмоны, ионы или ультраохлаждённые атомы (см. [1]). В [40] сообщается, что власти Японии поддержат проект и выделяют на него около 1,76 млрд долл. Несмотря на высокие инвестиции, ученые отмечают, что в итоге им удастся создать недорогой КК за счет снижения стоимости охлаждающего оборудования, и в будущем применение КК позволит значительно ускорить процессы выполнения сложных вычислений.

Государственное финансирование создания КК в Японии будет осуществляться из фондов для поддержки развития новых наукоемких отраслей и стартапов. Уже только это, по расчетам правительства, позволит к 2030 году довести число пользователей квантовыми компьютерами в стране до 10 млн чел. и сформировать рынок услуг стоимостью 50 трлн иен [37]. Многие японские специалисты отмечают, что Япония обладает ценными технологиями, но в стране "редко оказывается энергичная поддержка частных инвестиций до тех пор, пока в других странах не признают их ценность". Констатируется, что невозможно выйти вперед, "если просто следовать зарубежным тенденциям". Для быстрого выхода на передовые позиции "есть настоятельная необходимость в создании структуры с участием государственного и частного секторов". В мае 2021 года на сессии парламента Японии был принят пакет законопроектов о цифровой реформе. В сентябре 2021 года в японском правительстве начало действовать Управление цифровизации (его штат около 600 человек). Основная задача этого Управления — внедрение компьютерных систем в социальную и экономическую инфраструктуру общества, включая финансы, здравоохранение, транспорт [37]. Управлению цифровизации предоставлены широкие полномочия, которые выходят за рамки традиционных юрисдикций министерств Японии. Например, оно уполномочено давать рекомендации другим правительственным учреждениям и контролировать бюджеты, связанные с информационными системами, во всех правительственных структурах [37].

**КК в Индии.** Индия идеально подходит на роль мирового лидера в области квантовых вычислений, но из-за исторических условий развития и культурных особенностей эта страна сегодня значительно отстает от Китая в вопросах создания квантовых компьютеров [41–43].

<sup>8</sup> Специалисты *Google* считают, что практически полезным будет такой КК, регистр которого будет содержать 1000 или даже десятки тысяч логических кубитов. Специалисты *IBM* заявляют, что это не так. В *IBM* полагают, что практически полезным будет КК с регистром приблизительно в 100 логических кубитов. Именно поэтому в название КК, запущенного в Японии, включили слово "практический".

Индия быстро развивается в области науки. Так, еще три года назад она не входила в двадцатку стран лидеров по расходам на НИОКР, но уже в 2022 году, опередив Россию, поднялась на 40-е место в рейтинге Глобального инновационного индекса. Индийские города Бангалор, Дели, Мумбаи и Ченнай вошли в Топ100 научно-технологических кластеров мира [42, 43]. Сегодня Индия, благодаря наличию большого количества англоговорящих специалистов-профессионалов, является страной, в которой многие мультинациональные корпорации создают аутсорсинговые компании. Индия также превратилась в значительного экспортёра собственного программного обеспечения (ПО). В 2021 году доход от экспорта ПО составил примерно 2,2 млрд долл. Экспорт ИТ-сектора из Индии в 2022 финансовом году составил около 178 млрд долл. [42]. Сначала 2020-х годов всё чаще говорят об "индийском информационном чуде" и о превращении Индии в мировой ИТ-хаб. Глобальные информационные компании, такие как *Facebook*, *Google*, *Amazon*, а также американские и арабские инвестиционные фонды стремятся вкладывать в ИТ-отрасль Индии и развивать сотрудничество с индийскими ИТ-корпорациями, такими как *Jio Platforms*, например, или *Tata Consultancy Services*, которая к 2021 году превратилась в крупнейшую мировую транснациональную компанию с рыночной капитализацией в 200 млрд долл. Три четверти ИТ-специалистов в мире — индийцы. Город Бангалор, где производится 38 % экспортных ИТ-продуктов Индии, в ближайшие годы может обойти Сан-Франциско с его Кремниевой долиной и стать важнейшим мировым центром ИТ [42, 43].

Индия соревнуется с Китаем в создании собственных квантовых компьютеров с регистром в 1000 кубитов [44]. В апреле 2023 года правительство Индии выделило 730 млн долл. на реализацию Национальной квантовой миссии, цель которой — создать к 2031 году КК среднего масштаба на 50—1000 физических кубитов [46].

Департамент науки и технологий Индии планирует создать свой собственный квантовый компьютер, так как КК считаются сегодня самыми быстрыми вычислительными средствами на Земле<sup>9</sup>. Следует обратить особенное внимание на то, что в Индии главным считают военное применение КК. С помощью квантовых компьютеров индийские военные планируют решать разные задачи, от полевых военных формирований до внутренних испытаний ракет и испытаний на получение водорода из природного газа. Ожидается, что КК могут помочь индийской космической программе *ISRO* [45, 46]. Плани-

руется также использовать КК для правильного прогнозирования погоды.

Физические факультеты Индийского института науки в Бангалоре и исследовательская организация *Harish Chandra Research* в Аллахабаде занялись теоретическими аспектами квантовых вычислений, что стало первым шагом к созданию программы "Квантовый компьютер Индии". Индия сильна в теории квантовой механики и теоретической физике.

Индия также сильна в написании программ на языках квантового программирования, однако в области аппаратного обеспечения квантовых вычислений есть отставание от Китая, России и США. В августе 2023 года эксперты со всей страны собрались в Аллахабаде на семинар по разработке упомянутого выше КК на 50—1000 физических кубитов, в котором приняли участие специалисты канадской компании *D-wave Systems*. По мнению экспертов, до создания собственного КК Индии осталось как минимум два года. В настоящее время Организация оборонных исследований и разработок, Институт фундаментальных исследований имени Таты и *Tata Consultancy Services* продолжают разрабатывать в Индии 7-кубитный КК.

В Индии надеются на помощь США в разработках КК. В июне 2023 года США и Индия учредили совместный механизм для содействия сотрудничеству между промышленностью, научными кругами и госструктурами. В июле 2023 года США заявили, что приветствуют участие Индии в обмене достигнутыми успехами в области квантовой запутанности, а также ее участие в Консорциуме экономического развития квантовых технологий для содействия экспертному и коммерческому обмену с ведущими квантовыми странами. В сентябре 2023 года между странами были достигнуты договоренности в области научного сотрудничества, включая освоение космоса, биотехнологии и квантовые вычисления [44, 45]. Таким образом, несмотря на амбициозные планы, Индии предстоит проделать большую работу, чтобы догнать Китай в международной квантово-компьютерной гонке. Поддержка США может помочь индийцам ускорить разработки, но потребуются значительные инвестиции для достижения поставленных целей к 2031 году [46].

*КК в Южной Корее.* Южная Корея — одна из самых технологически развитых стран в мире. Она является родиной таких гигантов ИТ-индустрии, как *Samsung*, *LG* и *Hyundai*, которые играют важную роль в мировой экономике. Республика Корея (РК) самым активным образом участвует в создании систем квантовой связи. Южнокорейская компания *SK Telecom (SKT)* объявила, что правительство РК профинансировало строительство 250 км квантовой сети связи по разработанной *SKT* технологии сетей связи с квантовой криптографией [47]. Скорость передачи ключей шифрования по сети составит 10 Кбит/сек на 50 км, будут применяться сете-

<sup>9</sup> В Департаменте приводят интересный пример. КК потребуется на 3,5 млн шагов меньше, чем традиционной машине, чтобы отсортировать и проанализировать миллиард чисел — КК может найти решение всего за 31623 шага. Это немного по сравнению с 3,5 млн шагов, которые сделал бы классический компьютер [45].



вые карты шифрования 40 Гбит/сек, мультиплексироваться три 4-х канальные карты по 10 Гбит/сек на канал, что позволит достигнуть общей скорости шифрования 120 Гбит/сек. Компания SKT уже применила технологию шифрования с использованием квантового распределения ключей в сетях 5G в метро. В эпоху 5G и 6G важность кибербезопасности в мобильной связи будет расти в геометрической прогрессии. Мобильная связь может быть использована и для вычислительных сетей КК. Квантовая криптография — уникальное решение для защиты важной информации, предотвращающее копирование данных, закодированных в квантовых состояниях. В настоящее время южнокорейские криптографические компании работают над возможностью применения этой технологии в оборонной отрасли и в социальных сферах. Повторим, что надёжная квантовая связь необходима и для создания квантовых вычислительных сетей.

Разработка КК в Республике Корея опирается на собственную академическую науку и на сотрудничество с южнокорейскими частными компаниями, а также с учёными из США и Японии. В области развития квантовых вычислений Министерство науки и Институт квантовых технологий Республики Корея сотрудничают с американской компанией IonQ (см. [1]), а Передовой технологический институт компании Самсунг и университеты Сонгюнган и Ёнсе ведут активную совместную деятельность с IBM [48]. Четвёртый квантовый компьютер *Quantum System One*<sup>10</sup>, о котором IBM сообщила ещё в 2021 году, был установлен в Республике Корея [49] для подготовки профессиональных кадров, способных проводить квантовые вычисления. В IBM отмечают, что сегодня во всём мире насчитывается только 3000 таких специалистов. На этом квантовом компьютере Южная Корея рассчитывает к 2030 году обучить 1000 высококлассных специалистов.

Многие российские ученые хотели бы сотрудничать с южнокорейскими специалистами в таких высокоточных прорывных научных направлениях, как КвМ, квантовые вычисления и технологии. В университетах Корё, Ёнсе, Сонгюнган, в Центре квантовой наноауки, в Корейском исследовательском институте стандартов и науки, а также в Корейско-американском научном центре кооперации ведутся работы в области революционной технологии "Квантум 2.0" — технологии кубитовых суперпозиций и запутанности [47].

Министерство науки Республики Корея инвестировало более 40 млн долл. в стратегию исследований и разработок в области квантовых технологий, направленную на развитие аппа-

ратной части КК и её новой архитектуры, квантовых алгоритмов, квантовую инфраструктуру, создание команд ученых по перспективным технологиям. В 2023 году планируется завершить создание квантового процессора общего назначения с 5 кубитами с надёжностью 90 %. Предполагается использовать следующие языки программирования КК — *OpenQASM*, *Q#*, *LIQUI*, *QCL*, *Quipper* [49].

Известно, что в Южной Корее хорошо развиты полупроводниковые технологии, которые можно использовать для создания КК. Так, в одном из исследовательских центров РК используют ультрасовременные полупроводниковые технологии для производства кубитов (трансмонов). Целью исследования является создание к 2027 году 50—100 кубитного южнокорейского КК [47]. В области разработок КК южнокорейские исследователи сотрудничают с японскими учеными. Физики из Республики Корея и Японии разработали новый тип оптических ловушек, позволяющих многократно захватывать и высвобождать одни и те же атомы и обмениваться ими между соседними ловушками. Эта технология может стать основой для КК с перемещаемыми кубитами, и, по сути, основой новой квантовой связи для создания многопроцессорных КК [50].

*КК в Иране.* Иран является одним из наиболее технологически развитых государств региона. Санкции, наложенные на Иран в 1979 году, ограничили его доступ к новым технологиям. Это способствовало тому, что Иран развил собственную науку и добился больших успехов в развитии космической техники, нанотехнологии, робототехники. После запуска в 2009 году спутника "Омид" ("Надежда") с помощью собственной ракеты-носителя Сафир-2 с космодрома Семнан, Иран стал девятой по счёту космической державой и 43-й страной со своим собственным спутником в космосе. По уровню развития нанотехнологий по данным *Statnano* за 2022 год Иран уступает Китаю, США и Индии и занимает 4 место в мире. Общий объем продаж иранских нанопродуктов за 2022 год составил почти 600 млн долл.

Известны крупные успехи иранских математиков. В 2014 году выпускница Технологического университета Шарифа и Гарвардского университета, а в настоящее время профессор Стэнфордского университета М. Мирзахани, удостоилась Филдсовской премии, став первой гражданкой Ирана и первой женщиной-лауреатом этой одной из самых престижных в мире математических премий.

В июне 2023 года Иран представил первый в стране КК, который оказался обычным одноплатным компьютером на базе устаревшего ARM-процессора, и который не умеет выполнять квантовые вычисления [51]. Обман вскрылся очень быстро. Но это свидетельствует о том, что в Иране понимают необходимость разрабатывать КК. Можно уверенно сказать,

<sup>10</sup> Напомним, что сегодня IBM представила совершенно новую квантовую вычислительную платформу *Quantum System Two* (см. [1]), но по каким-то причинам не готова пока ее распространять.

что работы в этом направлении в Иране уже ведутся (для атомного оружия), но пока презентовать иранский КК по каким-то причинам нельзя. Вероятно, он ещё не отлажен до такой степени, когда его можно представить, или же потому, что боевые возможности Ирана держатся в строгом секрете.

**КК в Сингапуре.** В Сингапуре, в Центре квантовых технологий<sup>11</sup> создали КК, способный предсказать будущее человечества, о чем стало известно в апреле 2023 года [52]. Ученые не скрывают, что долгие годы трудились над созданием КК и изучали квантовые вычисления. Этот КК может одновременно рассчитать/предвидеть около 16 вероятных картин будущего нашей планеты и всего человечества. Пока о возможных сценариях будущего человечества создатели КК не рассказывают, как не рассказывают и о характеристиках квантового компьютера (например, о числе кубитов и физических основах, на которых построен КК).

В следующей части обзора будет рассказано о разработках квантовых компьютеров в Европе (Франция, ФРГ, Австрия, Англия, Нидерланды, Италия, Испания, Дания, Израиль, Швейцария), Австралии, ЮАР и Латинской Америке.

### Литература

1. *Правильщиков П. А.* Международная квантово-компьютерная гонка и квантовые информационные технологии (Часть I) // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2023. № 3. С. 3—18.
2. Блеск и нищета квантовых вычислений [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1072773/blesk-i-nishcheta-kvantovih-vychisleniy> (дата обращения: 12.09.2023).
3. *Детинич Г.* Процессоры для квантового компьютера на 1 млн кубитов будут выпускать в США на заводе прошлого века [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1086179/protessori-dlya-kvantovogo-kompyutera-na-million-kubitov-budut-razrabativat-i-vipuskat-v-ssha-na-zavode-proshlogo-veka> (дата обращения: 12.09.2023).
4. *Куксон К.* PsiQuantum ожидает появления коммерческого квантового компьютера к 2025 году [Электронный ресурс]. URL: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.4ef02aca-65717173-2f549729-74722d776562/https/www.ft.com/content/a5af3039-abbf-4b25-92e2-c40e5957c8cd](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.4ef02aca-65717173-2f549729-74722d776562/https/www.ft.com/content/a5af3039-abbf-4b25-92e2-c40e5957c8cd) (дата обращения: 07.12.2023).
5. *Wadhwa V.* Quantum computing is about to overturn cybersecurity's balance of power [Электронный ресурс]. URL: <https://www.washingtonpost.com/news/innovations/wp/2015/05/11/quantum-computing-is-about-to-overturn-cybersecuritys-balance-of-power/> (дата обращения: 07.12.2023).
6. *Волкова В. Н., Чёрный Ю. Ю.* К 50-летию появления термина "информатика" в отечественной научной литературе // Прикладная информатика. 2013. № 4(46). С. 130—134.
7. *Цаплин А. И.* Фотоника и оптоинформатика. Введение в специальность: учеб. пособие. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012.
8. *Беспалов В. Г.* Основы оптоинформатики. Часть I. Информационные технологии — от электронного к оптическому компьютеру. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2006 [Электронный ресурс]. URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/131.pdf> (дата обращения: 09.12.2023).
9. *Детинич Г.* Китайский квантовый компьютер смог в миллиарды раз превзойти классическую систему в одной научной задаче [Электронный ресурс]. URL: [https://vk.com/wall-57030687\\_66493?ysclid=lpuvggnd4n628630076](https://vk.com/wall-57030687_66493?ysclid=lpuvggnd4n628630076) (дата обращения: 07.12.2023).
10. *Булдина В.* В Китае создан самый мощный в мире квантовый компьютер [Электронный ресурс]. URL: [https://www.gazeta.ru/tech/2020/12/07/13390213/quantum\\_china.shtml?ysclid=lpuvhwntz7793732720](https://www.gazeta.ru/tech/2020/12/07/13390213/quantum_china.shtml?ysclid=lpuvhwntz7793732720) (дата обращения: 07.12.2023).
11. *Таиров Р.* Китай заявил о создании квантового компьютера в 10 млрд раз быстрее машины Google [Электронный ресурс]. URL: [https://www.forbes.ru/newsroom/tehnologii/415467-kitay-zayavil-o-sozdaniikvantovogo-kompyutera-v-10-mlrd-raz-bystree?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com](https://www.forbes.ru/newsroom/tehnologii/415467-kitay-zayavil-o-sozdaniikvantovogo-kompyutera-v-10-mlrd-raz-bystree?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com) (дата обращения: 19.12.2020).
12. *Макаренко Н.* Китайский прорыв в фотонных квантовых вычислениях: 200 секунд вместо 2,5 миллиарда лет [Электронный ресурс]. URL: <https://naukatehnika.com/kitajskij-proryiv-v-fotonnyix-kvantovyix-vychisleniyax-200-sekund-vmesto-2-5-milliarda-let.html> (дата обращения: 29.12.2020).
13. Китай достиг мирового квантового превосходства [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/news/2020/12/09/supremacy/> (дата обращения: 19.12.2020).
14. Китай совершил прыжок в квантовое будущее. Инженеры КНР научат человечество "думать" в миллиарды раз быстрее [Электронный ресурс]. URL: <https://zen.yandex.ru/media/svpressa/kitai-sovershil-pryok-v-kvantovoe-budusce-injenery-knr-nauchat-chelovechestvo-dumat-v-milliardy-raz-bystree-62aca6d26629e13083b8fc2e> (дата обращения: 11.08.2021).
15. *Chik H.* Chinese quantum computer is 180 million times faster on AI-related tasks, says team led by 'father of quantum' Pan Jianwei [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3223364/chinese-quantum-computer-180-million-times-faster-ai-related-tasks-says-team-led-physicist-pan> (дата обращения: 20.06.2023).
16. *Кармаза О.* Квантовые компьютеры могут создавать новые миры и новых людей [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2021/01/19/kvantovye-kompiutery-mogut-sozdavat-novye-miry-i-novyh-liudej.html> (дата обращения: 27.10.2023).
17. *Детинич Г.* Китай наметил на достижение квантового превосходства в задачах ИИ [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1088108/kitay-nameknul-o-dostigennii-kvantovogo-prevoshodstva-v-zadachah-s-iskusstvennim-intellektom> (дата обращения: 27.10.2023).
18. *Han-Sen Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng, Ming-Cheng Chen, Li-Chao Peng et al.* Quantum computational advantage using photons // Science. 2020. V. 370. Is. 6523. P. 1460—1463. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abe8770> (дата обращения: 26.09.2023).

<sup>11</sup> Центр квантовых технологий — это исследовательский центр передового опыта, расположенный при Национальном университете Сингапура. Центр объединяет физиков, специалистов по информатике и инженеров для проведения фундаментальных исследований в области квантовой физики и создания устройств, основанных на квантовых явлениях.

19. *Детинич Г.* В Китае запустили самые быстрые в мире программируемые квантовые компьютеры [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1052293/v-kitae-zapustili-samie-bistrie-v-mire-programmiruemie-kvantovie-kompyuteri> (дата обращения: 11.08.2021).
20. *Правильщиков П. А.* "Физическая" теорема Нётер в фотонике и computer science (Часть I) // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 144—154.
21. *Правильщиков П. А.* "Физическая" теорема Нётер в фотонике и computer science (Часть II) // Прикладная физика. 2006. № 1. С. 95—109.
22. *Правильщиков П. А.* Закон сохранения перебора и естественный параллелизм D-алгоритмов для построения тестов и моделирования в технической диагностике // Автоматика и телемеханика. 2004. № 7. С. 156—199.
23. *Правильщиков П. А.* Квантовый подход к решению задач формальной верификации цифровых схем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2023. № 1. С. 10—20.
24. *Правильщиков П. А.* Квантовое решение булевых уравнений и проблема  $P = ? NP$  // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 1. С. 50—64.
25. *Торнбрук Э.* Китай выигрывает гонку квантовых технологий у США [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZALoZDb8MwnOSAOa> (дата обращения: 12.09.2023).
26. Китайский квантовый компьютер на 255 кубит продемонстрировал невероятную мощность [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZSv5vk0Y7CaqBdyA> (дата обращения: 30.10.2023).
27. *Steffen M.* What's the difference between error suppression, error mitigation, and error correction? [Электронный ресурс]. URL: <https://research.ibm.com/blog/quantum-error-suppression-mitigation-correction> (дата обращения: 01.11.2023).
28. *Прескилл Дж.* Квантовая информация и квантовые вычисления (Том 1). — Москва-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика. Институт компьютерных исследований, 2008. — 464 с.
29. *Прескилл Дж.* Квантовая информация и квантовые вычисления (Том 2). — Ижевск: Удмуртский государственный университет, 2011. — 312 с.
30. *Sukbae Lee, Ji-Hoon Kim, Young-Wan Kwon.* The First Room-Temperature Ambient-Pressure Superconductor [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2307.12008> (дата обращения: 26.09.2023).
31. Сотрудники ФИАН прокомментировали сенсационное сообщение о сверхпроводнике, работающем при комнатной температуре и атмосферном давлении [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=0dde9896-4095-433c-aaf1-8eb50cde14ef#content> (дата обращения: 26.09.2023).
32. Intel и AMD больше не нужны. Выпущены домашние квантовые ПК дешевле Lada Granta [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cnews.ru/news/top/2022-12-20\\_intel\\_i\\_amd\\_bolshe\\_ne\\_nuzhnysozdany](https://www.cnews.ru/news/top/2022-12-20_intel_i_amd_bolshe_ne_nuzhnysozdany) (дата обращения: 08.02.2023).
33. *Касми Э.* Создан квантовый компьютер дешевле Mac Pro и "Лады Гранты". Он умещается на столе [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cnews.ru/news/top/2021-02-02\\_sozdan\\_miniatyurnyj\\_kvantovyj](https://www.cnews.ru/news/top/2021-02-02_sozdan_miniatyurnyj_kvantovyj) (дата обращения: 02.02.2021).
34. *Соколов П. С.* Гонка за квантовым компьютером: кто первым заменит биты на кубиты [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/onlinepatent/articles/735802/> (дата обращения: 11.09.2023).
35. *Shor P. W.* Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring // Proceedings 35th Annual Symposium on IEEE. 1994. P. 124—134.
36. *Петренко А. С., Петренко С. А.* Метод оценивания квантовой устойчивости блокчейн-платформ // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 3(49). С. 2—22.
37. *Тебин Н. П.* Страна восходящего квантового превосходства [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ng.ru/science/2022-06-07/14\\_8455\\_japan.html?ysclid=lpuvwd2ude772871436](https://www.ng.ru/science/2022-06-07/14_8455_japan.html?ysclid=lpuvwd2ude772871436) (дата обращения: 07.12.2023).
38. *Детинич Г.* В Японии запустили первый квантовый компьютер местного производства — к нему сразу возникла очередь [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1084213/v-yaponii-zapustili-oblachniy-dostup-k-kvantovomu-kompyuteru-mestnogo-proizvodstva-k-nemu-srazu-voznikla-ochered-iz-tehnogigantov> (дата обращения: 29.03.2023).
39. Японские ученые запустили свой первый квантовый компьютер местного производства [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZCRnyXBp2UL8pfob> (дата обращения: 7.06.2023).
40. *Никифорова А.* К 2030 году в Японии построят квантовый компьютер, которому не нужно охлаждение. [Электронный ресурс]. URL: <https://hightech.fm/2021/12/23/quantum-computer-japan> (дата обращения: 01.11.2023).
41. Ключевые проблемы квантовых вычислений в Индии [Электронный ресурс]. URL: <https://digitrain.ru/articles/380956/> (дата обращения: 14.08.2023).
42. Стоимость экспорта ИТ-программного обеспечения и услуг из Индии в 2022 финансовом году, по видам [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/statistics/320753/indian-it-software-and-services-exports/> (дата обращения: 08.12.2023).
43. *Костенков А.* Почему и как Индия стала глобальным ИТ-гигантом? [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/578672/> (дата обращения: 02.11.2023).
44. Китай и Индия соревнуются в создании квантовых компьютеров на 1000 кубитов [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZQuA57Q8Y2vemFcR> (дата обращения: 02.11.2023).
45. Индия присоединится к Китаю и США со своим собственным квантовым компьютером [Электронный ресурс]. URL: <https://enenggi.com/ru/articles/958-india-to-join-china-and-the-united-states-with-its-own-quant> (дата обращения: 02.11.2023).
46. Индия станет мировым лидером квантовых вычислений к 2031 году [Электронный ресурс]. URL: <https://www.securitylab.ru/news/537699.php> (дата обращения: 14.08.2023).
47. Квантовые амбиции южнокорейской науки [Электронный ресурс]. URL: [https://vk.com/wall-133327734\\_20792](https://vk.com/wall-133327734_20792) (дата обращения: 04.11.2023).
48. Ionq сотрудничает с Южной Кореей для развития квантовых вычислений. [Электронный ресурс]. URL: <https://klimov.com/news/article/ionq-sotrudnichaet-s-yuzhnoi-koreei-dlya-razvitiya-kvantovyh-vychislenii/> (дата обращения: 04.11.2023).
49. Banta Elizabeth IBM and Yonsei University Unveil Collaboration to Bring IBM Quantum System One to Korea. [Электронный ресурс]. URL: <https://newsroom.ibm.com/2021-11-16-IBM-and-Yonsei-University-Unveil-Collaboration-to-Bring-IBM-Quantum-System-One-to-Korea> (дата обращения: 09.12.2023).
50. *Детинич Г.* Создана основа для квантовых компьютеров с переменным числом квантовых битов.

[Электронный ресурс]. URL: <https://nauka.tass.ru/наука/17229633> (дата обращения: 04.11.2023).

51. Дорофеев Г. Обман 80 уровня. Первый в истории иранский квантовый компьютер оказался ARM-платой, которая продается в России [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cnews.ru/news/top/2023-](https://www.cnews.ru/news/top/2023-06-14_obman_80_urovnyapervyj_v_istorii)

06-14\_obman\_80\_urovnyapervyj\_v\_istorii (дата обращения: 14.08.2023).

52. Создан квантовый компьютер, способный предсказать будущее человечества [Электронный ресурс]. URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/210350177> (дата обращения: 10.08.2023).

## INTERNATIONAL QUANTUM COMPUTER RACE AND QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGY. *PART 2* (Review)

P. A. Pravilshchikov

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (RAS),  
Moscow, Russia

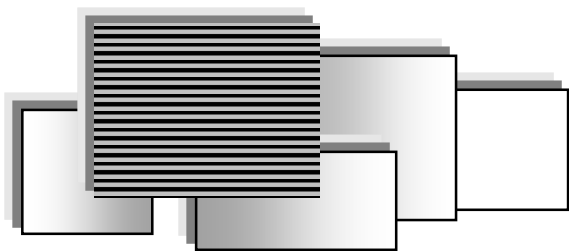
*An overview of the current state of development of quantum computers, quantum algorithms and quantum programming languages in Asian countries is provided. It is noted that China and the United States are currently leading the quantum computer race. It is emphasized that the development of quantum algorithms is no less important than the development of the hardware of quantum computers.*

**Keywords:** quantum computers, quantum algorithms, quantum-computer race, quantum information technologies, quantum programming languages, quantum superiority, qubits, qutrits, ququadrts, qudits.

---

Правильщиков Павел Алексеевич, ведущий научный сотрудник.  
E-mail: [pravilshchikov@mail.ru](mailto:pravilshchikov@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2023 г.



## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.518.2

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_4\_31

EDN: RVMUYI

### КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

А. О. Бутко, канд. техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

*Рассматривается опыт использования разработанной в МАИ автоматизированной системы контроля параметров гальванических процессов химической обработки и нанесения покрытий. Приведен состав системы и принципы работы основных ее элементов, обеспечивающих частичную автоматизацию рабочих мест химиков и гальваников. Описаны особенности контроля подвеса деталей в ванне с использованием средств машинного зрения. Показано, что использование фотофиксации с распознаванием графических изображений позволяет сократить долю ручных операций контроля и повысить эффективность производственных процессов.*

**Ключевые слова:** автоматизация, видеонаблюдение, программирование, гальваника, инженерные расчеты, нейросеть, моделирование, распознавание изображений, комплексные системы, базы данных.

Сегодня в производстве авиационных и космических изделий все чаще применяются современные достижения в области информационных технологий. Вместе с тем, многие задачи до сих пор решаются вручную, что приводит к замедлению и снижению качества технологических процессов, особенно трудоемких и длительных. В качестве примера можно привести гальванические процессы химической обработки и нанесения покрытий на детали. Довольно часто эти процессы занимают значительное время, и выполнение работ вручную заметно сказывается на общем результате и затраченных ресурсах, особенно в случае ошибочных или некорректных действий операторов или техников.

Гальванические процессы химической обработки и нанесения покрытий обычно проходят в специальных цехах в ваннах с химически активной средой особого состава. Детали погружаются в раствор, на них крепятся электроды, при этом детали должны быть определенным образом ориентированы, что очень важно для правильного проведения операции. Большую часть процессов занимает время нахождения деталей в ванне, иногда это несколько часов, именно поэтому допущенные здесь ошибки и просчеты приводят к серьезным потерям времени. Неправильно нанесенное покрытие следует

удалить и, если это возможно, нанести покрытие заново, поэтому может потребоваться проведение повторных процессов, иногда замена детали, а в случае, если нарушения останутся незамеченными, повлечь более серьезные последствия. Все это может привести к срывам сроков сдачи всего изделия.

Ключевыми для получения требуемых результатов в процессах химической обработки и нанесения гальванопокрытий являются правильный подвес деталей в ванне и точное соблюдение их параметров — силы тока, состава раствора, температуры и прочих необходимых показателей. Изначально такие данные снимались измерительными приборами, иногда в ручном режиме. В настоящее время в ванну монтируются наборы современных датчиков, которые могут подключаться к компьютеру и передавать данные на монитор в режиме реального времени. Несмотря на это и на развитие современных технологий в области автоматизации производства, на некоторых предприятиях до сих пор в таких важных технологических процессах встречается использование ручного режима контроля и управления.

Из вышесказанного следует, что решение задачи повышения качества контроля и управления длительными процессами становится все

более актуальным в условиях ужесточения требований к соблюдению сроков сдачи продукции.

### Постановка задачи повышения качества контроля и управления гальваническими процессами

Для повышения качества результатов и эффективности технологических процессов химической обработки и нанесения гальванопокрытий необходимо решить две основные подзадачи:

1. Непрерывный контроль мастером или контролером ключевых параметров гальванических процессов с возможностью их оперативной корректировки.
2. Контроль правильности ориентирования изделий в ванне в ходе выполнения операции.

Решение первой подзадачи видится не слишком сложным. Как было отмечено выше, можно использовать комплекты современных датчиков. С этой целью:

- Подбирается набор датчиков для контроля параметров [1].
- Выполняется монтаж датчиков в ванны.
- Датчики подключаются к компьютеру или мобильному терминалу по стандартному интерфейсу и протоколу.
- Для сбора и вывода информации с датчиков разрабатывается программа с удобным и информативным интерфейсом.
- Программа устанавливается на рабочее место гальваника, химика или технолога.

Решить вторую подзадачу оказалось сложнее, она имеет множество нюансов и "подводных камней". Изначально ориентирование и подвес изделия в ванне выполнялись полностью вручную. Именно из-за этого возникало большее число проблем, так как человеческий фактор тут был на первом месте — все полностью зависело от навыков и опыта мастера. Чтобы избежать ошибок были введены процедуры контроля завеса, выполняемые самим мастером либо контролером, но опять же вручную, то есть "на глаз".

Для решения второй подзадачи было предложено внедрить автоматизированный процесс контроля подвеса изделий с использованием средств машинного зрения. На данном этапе разработок автоматизация подвеса не рассматривается, так как это более затратный способ.

### Условия решения задачи повышения качества контроля и управления гальваническими процессами

Для решения задачи повышения эффективности гальванических процессов была разработана автоматизированная Система контроля параметров (СКП) технологических операций лаборатории химической обработки [2]. Научно-иссле-

довательские работы проводились в подразделениях Московского авиационного института (МАИ) для гальванического цеха АО "НПО Энергомаш" им. академика В. П. Глушко (далее "НПО Энергомаш"). СКП позволяет повысить эффективность производства за счет частичной автоматизации процессов управления и контроля параметров технологических операций. В состав СКП входят доступные зарубежные компоненты и продукты отечественной разработки. С января 2023 года идет опытная эксплуатация СКП в базовой конфигурации, в дальнейшем планируется ее доработка и внедрение в другие подразделения, а затем и предприятия.

СКП в базовой конфигурации включает:

1. Набор приложений для автоматизации рабочих мест химика, гальваника и технолога.
2. Подсистему видео-, фотофиксации с использованием машинного зрения.

Дополнительно в Систему контроля параметров включены комплекты оборудования и датчиков для получения параметров гальванических процессов и передачи их в программную часть СКП.

В СКП используется следующее оборудование:

- Видео и фотокамеры для подсистемы машинного зрения:
  - *HIKVISION DS-2CD2083G0-1 4 mm*;
  - *HiWatch DS-I200(D) 2.8 mm*.
- Датчики для ванн:
  - погружной многопараметрический анализатор качества воды *Aqua TROLL 500*;
  - рентген флуоресцентный анализатор *Shimatzu 7000*;
  - датчики температуры;
  - датчики химсостава;
  - датчик электропроводности *AnaCONT LCK* с диапазоном от 100 до 2000 мкСм/см.
- Сетевое оборудование;
- Приспособления для монтажа камер;
- Устройства считывания магнитных карт и пропусков для идентификации;
- Планшеты *Samsung* для мобильных рабочих мест, имеющие:
  - уровень защиты *IP65*;
  - защиту от падений;
  - фронтальную камеру для видео-, фотофиксации и сканирования *QR* и штрихкодов;
  - модуль считывания *RFID* меток (*NFC*);
  - аккумулятор емкостью, позволяющей работать одну рабочую смену.

Заметную роль при разработке элементов СКП и выборе способов решения задач сыграли условия ее эксплуатации, для изучения которых специалисты МАИ выезжали в "НПО Энергомаш" и проводили необходимые измерения и оценки в гальваническом цехе.

Гальванический цех включает два помещения — основную лабораторию (в ней выполняется подавляющая часть технологических процессов с деталями) и небольшую лабораторию



для процессов серебрения (в ней установлено восемь ванн на одном уровне и пульты для управления). В основной лаборатории, размещенной на двух этажах (уровнях), установлены ванны прямоугольной и цилиндрической формы, мостки для прохода сотрудников и мостовой кран для перемещения деталей и узлов (рис. 1, 2).

Часть помещения основной лаборатории отведена под хранение оснастки для подвеса и инструментов. Для управления оборудованием имеется отдельное помещение, где установлены полки для документации и рабочие места мастеров, оснащенные компьютерами. В помещениях с ваннами освещение днем обеспечивается за счет естественного света из окон, в темное время суток работают осветительные лампы, размещенные под потолком. Над ваннами лампы отсутствуют. Ванны для основных операций находятся на верхнем уровне лаборатории в два ряда и разделены проходом, благодаря чему мастер получает доступ к передней стенке каждой ванны, где размещены кнопки управления. Над ваннами отсутствуют какие-либо конструкции для монтажа камер. Всего в основной лаборатории установлено 39 ванн на верхнем уровне и пять ванн на нижнем уровне.

В ходе оценок были выделены ключевые условия, повлиявшие на ход решения задачи: агрессивная среда и состав растворов в ваннах

условия освещения, прозрачность раствора в ванне и возможные места размещения камеры [2].

### Решение подзадачи контроля параметров гальванических процессов

Для решения подзадачи контроля параметров гальванических процессов было проведено исследование материально-технического оснащения гальванического цеха, в частности, расположения ванн, а также рабочих мест специалистов. Необходимо было определить места установки датчиков с учетом особенностей их эксплуатации в агрессивной среде. Датчики должны иметь защиту и стабильно работать в кислотной или щелочной среде в течение нескольких часов. Крепеж датчиков возможен как на стенки ванны, так и на рамы подвеса, электроды и крышку. Каких-либо сложностей с решением данной подзадачи не возникло, основными критериями были именно условия эксплуатации и правильный подбор датчиков. Для подключения датчиков к автоматизированной системе на рабочих местах технолога, химика и гальваника потребовалась укладка кабелей от ванн до сетевого маршрутизатора.

С целью подбора датчиков были определены параметры гальванического процесса, которые необходимо контролировать. Перечень параметров приведен в таблице.

Участок никелирования

1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12	1.11	1.10	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
Холодная промывка	Холодная промывка	H2SO4 HCl	HCl №153 150-200 г/л	HCl №2 310-350 г/л	HCl №3 50-100 г/л	Холодная промывка	Холодная промывка	ЭП-202 №27	HNO3 H2SO4 HF №61	HNO3 H2SO4 HF №41	HNO3 HF №50	Холодная промывка	Холодная промывка	Э.х. травление №42	Холодная промывка	Горячая промывка	Э.х. обезжиривание №157

1.29	1.21	1.33	1.23	1.22	1.24	1.25	1.26	1.27	1.28	1.19	1.20	1.31	1.32	1.30	1.34	1.35	1.36	1.37	1.38	1.39
№49 Меднение под пайку	Холодная промывка	Меднение пирофосфатное №20	№44	Холодная промывка	№45	№372	№372	Холодная промывка	Холодная промывка	Никелирование хлористое №29	№371	Холодная промывка	Холодная промывка	Меднение для уплотнения №45а	Холодная промывка	Холодная промывка	Осветление №23	Пассивация №43	Холодная промывка	Холодная промывка

Рис. 1. Схема верхнего уровня основной лаборатории

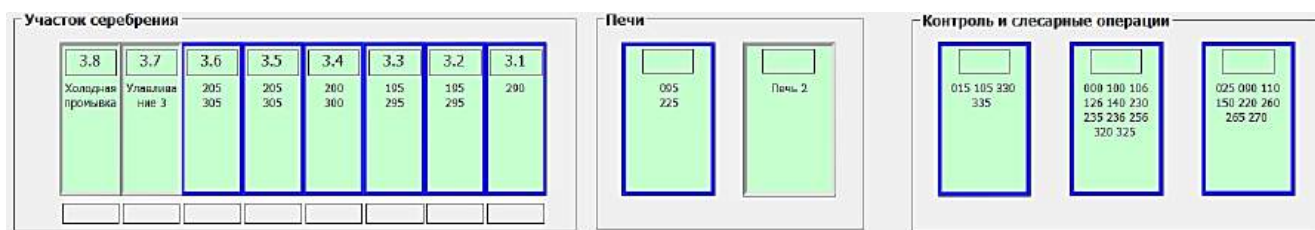


Рис. 2. Схема нижнего уровня основной лаборатории  
Параметры гальванического процесса

№	Параметр	Формат	Возможные значения	Наименование
1.	Толщина номинальная, Мкм	числовой	35	Толщина покрытия
2.	Толщина минимальная, Мкм	числовой	30	
3.	Толщина максимальная, Мкм	числовой	40	
4.	Обозначение покрытия	Выпадающий список	Таблица	
5.	Толщина, ед. изм.	Выпадающий список	Мкм (по умолчанию) Мм См Дм м	
6.	Температура номинальная, °С	числовой	65	Температура
7.	Температура минимальная, °С	числовой	60,00	
8.	Температура максимальная, °С	числовой	70,00	
9.	Температура, ед. изм.	Выпадающий список	°С (по умолчанию) K F	
10.	Сила тока номинальная, А	числовой	3,06	Сила тока
11.	Сила тока минимальная, А	числовой	2,76	
12.	Сила тока максимальная, А	числовой	3,36	
13.	Сила тока, ед. изм.	Выпадающий список	А (по умолчанию) Кл/С	
14.	Реверс тока	Выпадающий список	К — обработка на катоде А — обработка на аноде Р — реверсивный во времени (10 с — К, 1 с — А)	
15.	Плотность тока номинальная, А/дм <sup>2</sup>	числовой	1,5	Ток
16.	Плотность тока минимальная, А/дм <sup>2</sup>	числовой	1,0	
17.	Плотность тока максимальная, А/дм <sup>2</sup>	числовой	2,0	
18.	Плотность тока, ед. изм.	Выпадающий список	А/дм <sup>2</sup> (по умолчанию) А/мм <sup>2</sup> А/см <sup>2</sup> А/м <sup>2</sup>	
19.	Время номинальное, сек	числовой	240	Время
20.	Время минимальное, сек	числовой	235	
21.	Время максимальное, сек	числовой	245	
22.	Время, ед. изм.	Выпадающий список	сек мин час	
23.	Напряжение, номинальное значение, В	числовой	35	Напряжение
24.	Напряжение минимальное, В	числовой	30	
25.	Напряжение максимальное, В	числовой	40	
26.	Напряжение, ед. изм.	Выпадающий список	В (по умолчанию)	
27.	Уровень РН номинальный	числовой	6,5	Уровень РН
28.	Уровень РН минимальный	числовой	5,5	
29.	Уровень РН максимальный	числовой	7,5	

Программное обеспечение СКП получает от датчиков указанные в таблице параметры, передает их в автоматизированное рабочее место (АРМ) и записывает в базу данных. При наличии отклонений происходит информирование оператора, который принимает решение о продолжении или остановке процесса [1]. Алгоритм контроля параметров показан на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм контроля параметров и функции системы

Работа Системы контроля параметров происходит следующим образом. Оператор запускает приложение АРМ Гальваника на своем рабочем

месте или на планшете *Samsung*, для этого он авторизуется по своему пропуску — магнитной карте по протоколу *NFC*. Далее выбирает детально-сборочную единицу (ДСЕ), ванну и операцию, которая готовится к запуску. Затем с датчиков в режиме реального времени или непосредственно перед началом операции собираются нужные параметры и выводятся в диалоговые окна АРМ Гальваника. Пример окна показан на рис. 4.

### Решение подзадачи контроля правильности ориентирования изделий в ванне

В процессе решения подзадачи контроля правильности ориентирования изделий в ванне были рассмотрены два способа. Оба основаны на машинном зрении и используют камеры фотофиксации, подвешенные над ваннами [3–5]. Первый способ заключается в применении нейросетей для распознавания изображений, второй — в использовании специальных графических меток. Каждый способ имеет свои плюсы и минусы. Критерием выбора одного из них стали сроки разработки Системы контроля параметров, поставленные заказчиком. Для реализации в СКП процесса распознавания изображений нейросетями необходимо собрать значительный объем фотографий всех возможных деталей и всех возможных вариантов подвеса. Кроме того, чтобы получить возможность снять весь спектр проходящих через лабораторию деталей, пришлось бы ожидать заказов на их изготовление, что привело бы к значительному переносу сроков сдачи СКП.

Поз.	Технологическая операция	Оборудование	Толщ, мм	время	I, А	T, °C	A/дм² pH	Режим тока
030	Обезжиривание электрохимическое	Ванна 1.1		10 мин.				К, А
035	Промывка горячая	Ванна 1.2		2 мин.				
040	Промывка холодная	Ванна 1.3		2 мин.	25			
050	Активация химическая	Ванна 1.19		5 мин.				

	Номинал	Мин.	Макс.
Толщина, мм			
Температура, °C	25	15	35
Сила тока, А	10	8	12
Плотность тока, A/дм²	1,1	0,9	1,3
Режим	К		
Время, мин	10	10	12
Напряжение, В			
pH			
Материал	М		

Рис. 4. Диалоговое окно АРМ гальваника

Поэтому выбор был сделан в пользу способа распознавания на основе меток, реализация которого быстрее, но связана с определенными проблемами:

1. На оборудование и оснастку надо наносить специальные метки (прямоугольные пластины с графическим штрихкодом), которые не должны затираться со временем или портиться в агрессивной среде;

2. Метки имеют определенный размер и должны располагаться строго в горизонтальной плоскости;

3. Для успешного распознавания необходимо размещать камеру прямо над ванной.

Разместить метки на ванны оказалось возможным без особых трудностей, а вот нанести их на оснастку не всегда получалось. Это связано с тем, что оснастка представляет собой проволочные подвесы или металлические крюки, которые цепляются за горизонтальные балки на ванне (см. рис. 3, 4 в [2]). Было решено закрепить на верхней части оснастки небольшие пластинки, покрашенные яркой краской (красный цвет для анодов, синий для оснастки).

Разместить камеру строго над ванной не получилось из-за высоты потолка, отсутствия конструкций для крепления и агрессивных испарений из ванн, поэтому штативы для камер были размещены на задней стеке ванны (рис. 5).

В результате камера дает изображение с искажением, но был найден способ его корректировки программными средствами с помощью специальной библиотеки обработки изображений. Это незначительно сказалось на эффективности распознавания — с учетом всех искажений точность распознавания камерой, распо-

женной на расстоянии 1,8 м от плоскости наблюдения, составила 10 мм.

Еще одной проблемой стала мутность или непрозрачность раствора в ванне, что в принципе делало невозможным распознавание деталей на изображениях. Поэтому для операций, где применяется мутный химсостав, контроль расположения проводится только по положению оснастки, так как иной способ контроля не видится возможным.

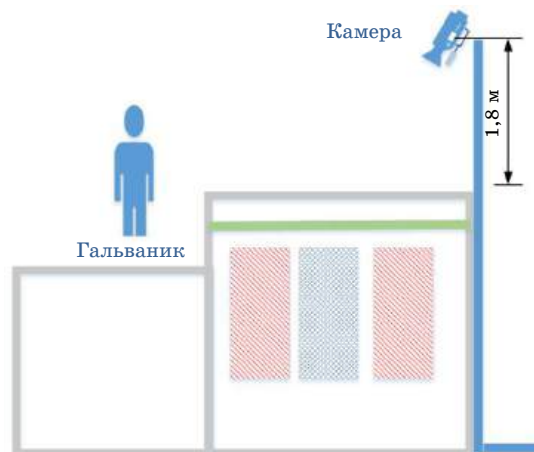


Рис. 5. Размещение камеры, оператора и подвесов в ванне

Для СКП было разработано отдельное приложение, включенное в состав АРМ Гальваника, формирующее схемы завеса и передающее их в АРМ. Приложение было протестировано на созданном в аудитории МАИ макете ванны с балками и подвесами (рис. 6).

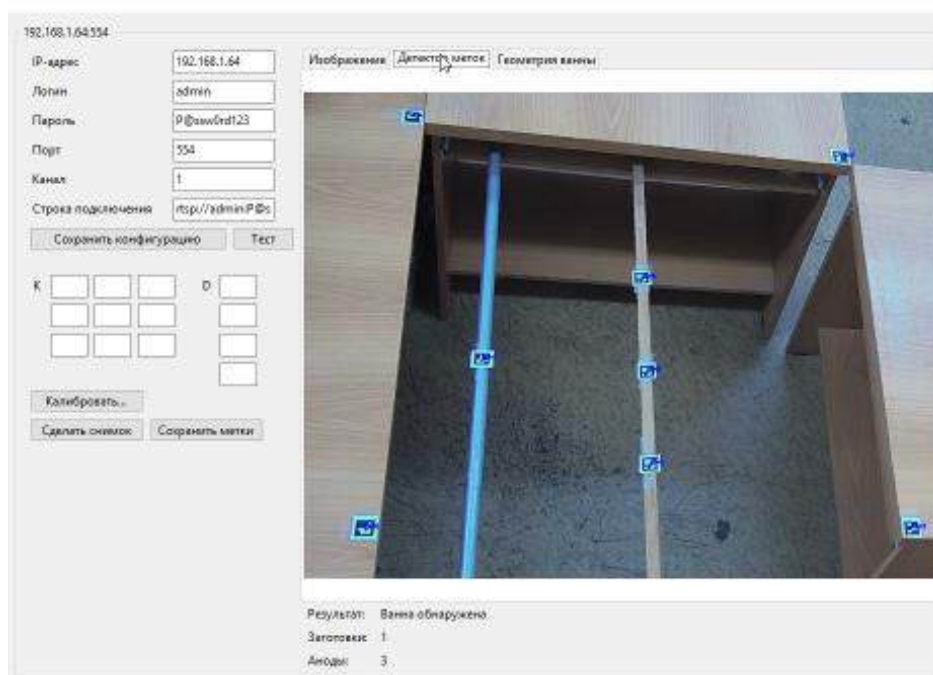


Рис. 6. Контроль расположения подвеса по меткам на макете ванны



Контроль правильности ориентирования изделий в ванне с помощью приложения для АРМ Гальваника осуществляется по следующему алгоритму:

1. Мастер выполняет подвес деталей в ванне.
2. Ванна подготавливается к операции.
3. Запускается АРМ Гальваника в режиме подготовки к выполнению операции.
4. Оператор нажимает кнопку "получить изображение" в главном окне приложения АРМ Гальваника на компьютере или в приложении на планшете *Samsung*.
5. Происходит получение изображения с камеры и передача его в программное приложение для распознавания.
6. Искажения изображения (из-за угла наклона камеры) корректируются.
7. Приложение распознает метки на изображении.
8. Формируется и передается в АРМ Гальваника схема подвеса (рис. 7).

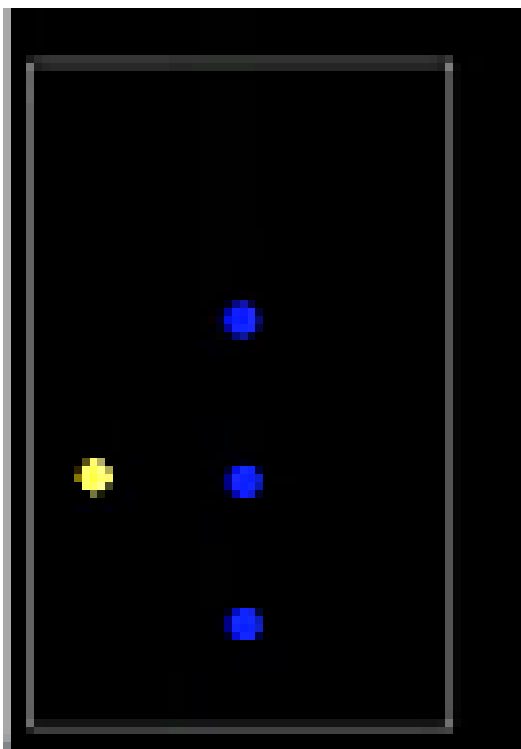


Рис. 7. Схема подвеса, формируемая приложением

Оценивается правильность расположения подвеса и выдается сообщение оператору.

Чтобы протестировать приложение для АРМ Гальваника на начальных этапах было сделано около 300 кадров расположения деталей в гальванических ваннах. Использована фотокамера *Canon eos600* с объективом *Samyand 28/14* мм. Снимки делались в основной лаборатории гальванического цеха с дистанций 1–1,8 м от верхнего уровня ванны при естественном освещении без применения искусственной дополнительной подсветки. Полученный набор кадров использо-

вался для проверки качества распознавания изображений в условиях эксплуатации во время реальных операций нанесения покрытий. В настоящее время приложение для АРМ Гальваника успешно работает в режиме опытной эксплуатации, в дальнейшем планируется накопление снимков для обучения нейросети и ее реализации в приложении.

#### Описание структуры и алгоритма работы Системы контроля параметров

В ходе решения ключевых задач контроля параметров сформировалась структура СКП, в которую вошли приложения для АРМ Химика, АРМ Технолога, АРМ Гальваника, АРМ лиц, принимающих решения [2], комплект оборудования (датчики и камеры) и приложение для распознавания изображений, которое в настоящее время дорабатывается под использование нейросети. АРМ Химика предназначено: 1) для обеспечения автоматизированного контроля САРП ТП\* химического состава рабочих веществ; 2) для управления технологическим процессом (ТП) в случае нештатных ситуаций в ТП, которые влияют на их химический состав; 3) для автоматизации функций инженера — химика пилотного участка. Задачами АРМ Технолога являются просмотр загруженных в САРП ТП технологических процессов и создание единичных технологических процессов. АРМ Гальваника предназначено для работы с операциями нанесения покрытий и фотофиксации. АРМ лиц, принимающих решения, используется для осуществления функций управления процессами. Все приложения уже развернуты в гальваническом цехе "НПО Энергомаш" и проходят тестирование в реальных условиях.

В данной статье была рассмотрена базовая часть СКП, связанная с контролем параметров операций и распознаванием изображений для контроля правильности ориентирования подвесов в ванне. Полный перечень функций СКП включает работу с базой данных технологических процессов и маршрутов, формирование цифрового паспорта изделия, видеофиксацию нештатных ситуаций и работу с отклонениями (рис. 8).

В полную версию Системы контроля параметров включены все упомянутые выше АРМ, и она доработана с учетом первых результатов эксплуатации. В настоящее время все ключевые функции СКП работают в полном объеме. Работа с АРМ будет более детально освещена в следующих статьях.

\* САРП ТП — система автоматизированной регистрации параметров технологических процессов, внедряемая в "НПО Энергомаш" в рамках пилотного проекта, реализуемого совместно с МАИ [6]. СКП является частью САРП ТП.

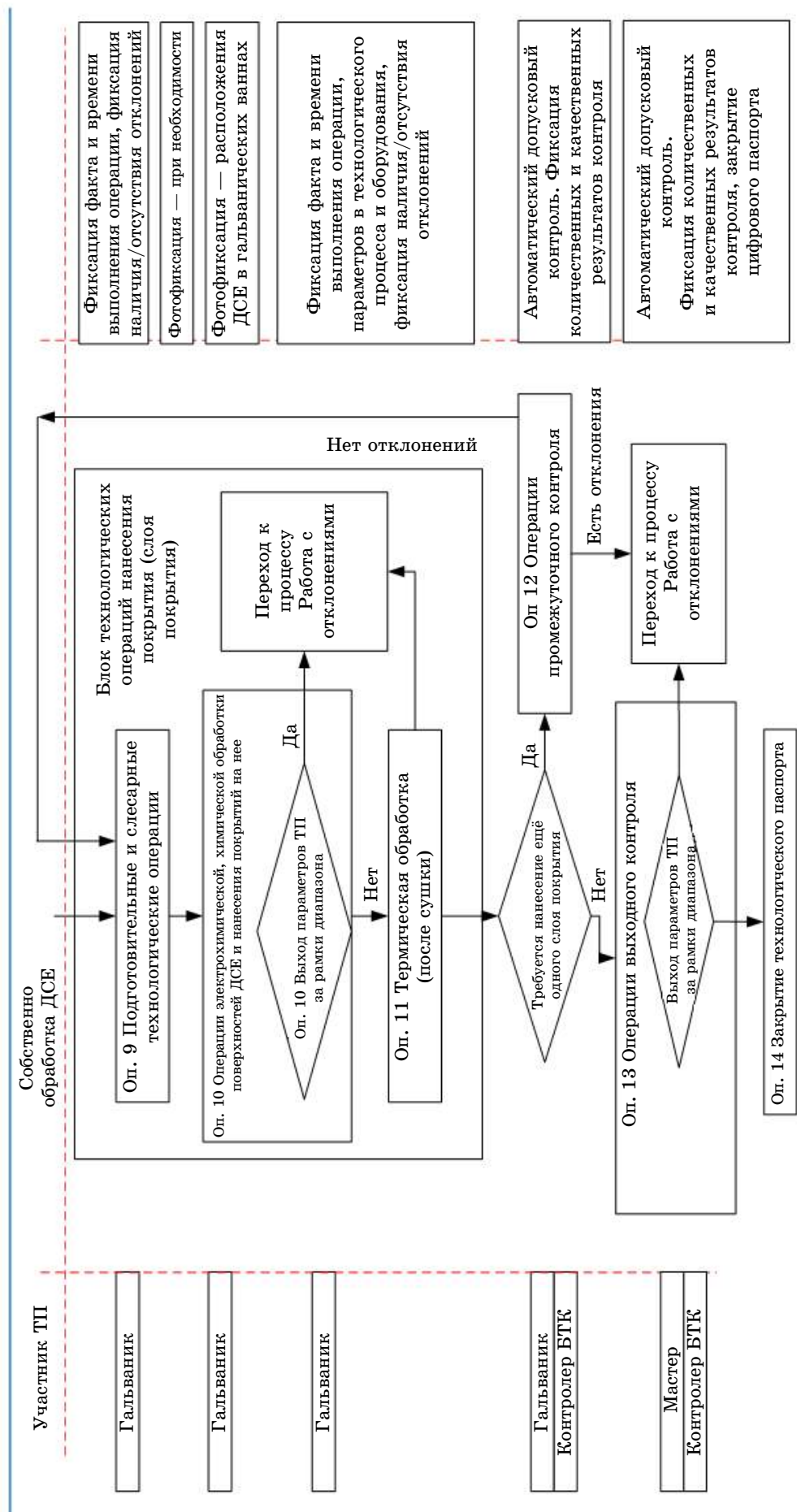


Рис. 8. Алгоритм работы СКП



## Заключение

Прошедшие к моменту написания данной статьи первые этапы опытной эксплуатации Системы контроля параметров в основной лаборатории гальванического цеха "НПО Энергомаш" показывают хорошие результаты. Использование СКП положительно сказывается на качестве процессов нанесения покрытий. Результаты пока еще трудно оценить в конкретных цифрах, но уже можно сказать, что отказ от ручного контроля снижает количество ошибок и повышает качество некоторых процессов, в которых ранее был зафиксирован высокий процент брака. Кроме того, благодаря автоматизации контроля трудоемкость ряда операций сокращается в среднем на 8–12 %.

Предложенная конфигурация автоматизированной Системы контроля параметров может найти применение не только для нанесения покрытий, но и в аналогичных технологических процессах, включающих подобные операции, где требуется контроль большого числа параметров и показателей.

## Литература

1. Колесников Д. А. Особенности реализации автоматизированной системы регистрации параметров процессов нанесения покрытий // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 1. С. 28–33.
2. Бутко А. О. Разработка элементов системы управления и контроля параметров технологических процессов лаборатории химической обработки // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2023. № 3. С. 39–47.
3. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение / под ред. С. М. Соколова, пер. с англ. А. А. Богуславского — 3-е изд. — М.: Из-во "Лаборатория знаний", 2015. — 763 с.
4. Фомин Я. А. Распознавание образов: теория и применения. — Изд. 2. — М.: ФАЗИС, 2012. — 432 с.
5. Форсайт Д., Понс Д. Компьютерное зрение. Современный подход. — М.: Вильямс, 2018. — 960 с.
6. Цикл лекций по САПР ТП стартовал на Энергомаше. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/31892/> (Дата обращения 20.11.2023).

## CONTROL OF GALVANIC PROCESS PARAMETERS USING MACHINE VISION

A. O. Butko

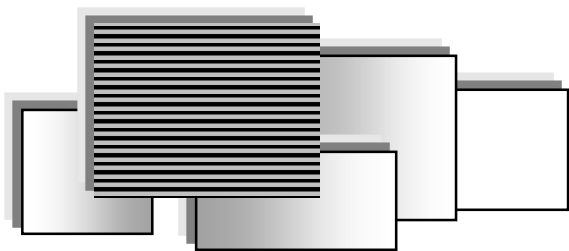
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The article discusses the experience of using an automated system for monitoring the parameters of galvanic processes of chemical processing and coating, developed at the Moscow Aviation Institute. The composition of the system and the principles of operation of its main elements, providing partial automation of workplaces for chemists and galvanizers, are given. The features of monitoring the suspension of parts in a bath using machine vision tools are described. It is shown that the use of photographic recording with graphic image recognition can reduce the share of manual control operations and increase the efficiency of production processes.*

**Keywords:** automation, video surveillance, programming, electroplating, engineering calculations, neural network, modeling, image recognition, complex systems, databases.

Бутко Антон Олегович, доцент.  
E-mail: [mati-tias@yandex.ru](mailto:mati-tias@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2023 г.



## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ. ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

УДК 004.942

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_4\_40

EDN: RZFWFE

### РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО АЛГОРИТМА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ ЖИДКОСТЬЮ НА БАЗЕ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА И ТЕХНОЛОГИЙ CUDA

А. А. Жиленков, канд. техн. наук; П. Е. Царева  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,  
Санкт-Петербург, Россия

*Изучен подход к моделированию обтекания тел жидкостью на основе уравнений Навье-Стокса. Предложено численное решение уравнений Навье-Стокса в трехмерном пространстве. Разработана математическая модель обтекания тела жидкостью и продемонстрированы результаты моделирования. Рассмотрены вопросы оптимального распределения программных ресурсов с использованием параллельных вычислений. Выделены потенциальные области применения разработанной математической модели обтекания тела жидкостью и направлений ее дальнейшего развития.*

**Ключевые слова:** моделирование жидкости, уравнения Навье-Стокса, численное решение, обтекание тел жидкостью, CUDA.

Моделирование играет важную роль, когда дело доходит до описания сложных физических объектов или связанных с ними процессов. В случае отсутствия возможности провести исследование реального объекта, последний можно заменить моделью, идеальной копией, которая не обязательно полностью воссоздает объект, но обязательно отражает свойства, важные для данного конкретного рассмотрения.

Моделирование обтекания тел жидкостью широко используют в разработке морских и подводных объектов при расчете и испытании их гидродинамических свойств. Многие задачи вычислительной гидродинамики можно отметить как задачи повышенной трудности, что обосновано отсутствием универсального метода описания поведения жидкости и общей сложностью найденных методов. За годы исследований было рассмотрено множество перспективных математических подходов как к самому описанию жидкости в разных состояниях, так и к решению основных уравнений.

#### Уравнения Навье-Стокса для описания жидкости

В качестве подхода к описанию жидкости с учетом вязкости обычно упоминается использование уравнений Навье-Стокса и уравнений Эйлера, позволяющих описывать ньютоновскую жидкость, т. е. вязкую жидкостью, которая подчиняется закону вязкого трения Ньютона (касательное напряжение линейно зависит от градиента скорости). На сегодняшний день это самый распространенный подход в вычислительной гидродинамике, так как он наиболее полно учитывает физические условия, что в результате создает более точную и реалистичную математическую модель. Несмотря на то, что в области моделирования жидкости были достигнуты немалые успехи, поиск решений для уравнений Навье-Стокса в трехмерном пространстве все еще является непростой задачей. Существует ряд особенностей, которые затрудняют работу с системой уравнений Навье-Стокса.

В общем случае уравнения Навье-Стокса для трех измерений нерешаемы. Кроме того, они обладают специфичным характером, поэтому при их решении стоит использовать стандартные методы для эллиптических уравнений [1]. Это означает, что для применения уравнений Навье-Стокса необходимо точно определить параметры среды и граничные параметры на всех направлениях, даже если в реальной ситуации рассматриваемая область бесконечна [2, 3]. Отсюда вытекает проблема замыкания, для решения которой требуется нахождение приближенных асимптотических решений. Система уравнений нелинейна, что может привести к образованию сложных структур при больших объемах вычислений, а параметр при старшей производной, который отражает изменение гладкости решения, создает отдельные вычислительные трудности, которые наглядно можно проследить через уравнение переноса с диссипацией [4, 5].

В определенном диапазоне чисел Рейнольдса для уравнений Навье-Стокса находится устойчивое решение, которое можно получить, используя стационарные или нестационарные уравнения, а также идентификацию через временной предел, который стремится к бесконечности [6, 7]. Но с увеличением числа начинает наблюдаться турбулентное движение и остаются неустойчивые решения с усложненной структурой, так что использование только уравнений Навье-Стокса оказывается недостаточно.

При решении уравнений Навье-Стокса часто применяют метод конечных разностей и его модификации, которые просто реализуются и довольно экономичны в отношении ресурсов, но обладают не самой высокой точностью и становятся трудно вычислимы в крайних границах.

Есть попытки вместо метода конечных разностей внедрять прямые методы, например методы Галеркина и метод конечных элементов. Методы Галеркина и некоторые их модификации точны и экономичны, но их сходимость сильно зависит от выбора пробных функций, так что реализация возможна только в ряде частных случаев. Метод конечных элементов отличается возможностью выбора аппроксимации с учетом вариационных принципов и позволяет использовать сложную геометрию, но не экономичен. Есть также методы, связанные с представлением решения в виде рядов или интерполяционных многочленов, где особое внимание уделяется алгоритмам "без насыщения" [8].

Решение математической части задачи — не единственная проблема в вычислительной гидродинамике. Для получения численного решения уравнений Навье-Стокса пространство разбивается на ячейки [9]. Подобно тому, как в лагранжевых методах для более точного результата необходимо большое количество частиц, для уравнений Эйлера и Навье-Стокса требуется больше ячеек в области моделирования, чтобы

результат был точнее и глаже. При этом на вычисления будет уходить больше вычислительных ресурсов [10].

### Подход к моделированию обтекания тела жидкостью

Для составления модели обтекания тела жидкостью необходимо составить уравнения для движения невязкой жидкости, несжимаемости, конвекции, диффузии, имитации потока.

Движение невязкой жидкости можно описать уравнением Навье-Стокса

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\frac{\Delta p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{V}, \quad (1)$$

где  $\nabla$  — оператор набла;  
 $\Delta$  — векторный оператор Лапласа;  
 $t$  — время;  
 $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости;  
 $p$  — давление;  
 $\rho$  — плотность;  
 $\mathbf{V}$  — вектор скорости.

Из всех величин четыре являются неизвестными. Это давление и компоненты скорости в трехмерном пространстве.

Уравнение (1) отображает сохранение массы при постоянной плотности, а также закон сохранения импульса, для которого нет очевидного способа связать скорость и давление из-за отсутствия доминирующей переменной.

Чтобы определить давление, рассмотрим его описание в общем виде через уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0. \quad (2)$$

Уравнение несжимаемости обеспечивает кинематическое ограничение, которое требует, чтобы при развитии поля скорость расширения исчезала везде. Для этого необходимо построить поле давления, которое гарантирует непрерывность, что можно сделать с помощью уравнения Пуассона для давления [4]. Уравнение Пуассона получаем с помощью добавления члена к правой части уравнения Лапласа (2):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = b. \quad (3)$$

Чтобы верно описать обтекание, необходимо также учесть конвекцию — процесс, при котором тепло или частицы переносятся воздухом или жидкостью, перемещаясь из одной точки в другую [4]. Диффузию можно рассматривать как процесс переноса через иммобилизованную жидкость или воздух, когда сама жидкость движется, частицы этой жидкости увлекаются за собой. Невязкое уравнение Бюргера представляет собой частный случай уравнения непрерывности, где соблюдается условие "ско-

рость движения частиц равна плотности вещества". Оно позволяет генерировать прерывистые решения из гладких начальных условий (аналогично созданию ударных волн) и без учета вязкости выглядит следующим образом:

$$c \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

где  $c$  — постоянная скорость переноса;  
 $u$  — скорость течения жидкости;  
 $t$  — время.

Уравнение диффузии отображает изменение концентрации с течением времени при температуре и отсутствии внешних сил (также называют уравнением теплопроводности) запишем его в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где  $u$  — скорость течения жидкости;  
 $t$  — время;  
 $v$  — коэффициент кинематической вязкости.

Наконец, для имитации потока, управляемого давлением, добавим в уравнение Навье-Стокса импульс в направлении  $x$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ = v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $F$  — заданный градиент давления;  
 $u, v, w$  — скорость течения жидкости;  
 $t$  — время;  
 $p$  — давление;  
 $v$  — коэффициент кинематической вязкости.

#### Результаты построения модели обтекания тела жидкостью

Математическая модель обтекания тела жидкостью включает уравнения (1), (3)—(6). Для

построения модели были приняты следующие параметры:  $dt = 0,1$  — временной шаг, количество временных шагов 1000,  $v = 0,1$ ,  $\rho = 1$ . Начальные условия  $u, v, w, p = 0$  везде, граничные условия:  $u, v, w, p$  периодические на  $x = 0, 2$ ,  $u, v, w = 0$  при  $y, z = 0, 2$ ,  $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$  при  $y, z = 0, 2$ ,  $F = 1$  везде.

В данной работе рассмотрена сходящаяся система, т. е. точность моделирования увеличивается с увеличением числа временных шагов. В отношении давления  $p$ , которое не зависит от времени и не вычисляется на каждом шаге с компонентами скорости, система достигнет равновесия при количестве итераций, стремящемся к бесконечности. Для вычисления давления  $p$  система будет итеративно решаться до выполнения установленного условия, определяющего достаточно малую разницу между итерациями, чтобы выйти из цикла. В рассматриваемой модели обтекания тела жидкостью было принято, что разница между текущим и последующим значениями не должна превышать 0,01.

Для программной реализации математической модели и выполнения вычислений был выбран язык программирования C++ и среда интерактивной разработки *Visual Studio*. Для обработки результатов вычислений использован *Python*, среда разработки *Jupyter Notebook* и библиотеки *matplotlib* и *plotlib* для визуализации данных.

Моделирование проводили в пространстве  $x, y, z \in [-1; 1]$ , где ось  $x$  разбита на 80 ячеек, а  $y$  и  $z$  на 40. Результаты моделирования для шара, параллелепипеда и цилиндра представлены на рис. 1—4, на которых правая шкала отображает давление жидкости, левая — ее скорость.

Хотя модель и поддерживает турбулентность, для каждого случая можно наблюдать ламинарное течение, что объясняется достаточно малым числом Рейнольдса, и обобщенную траекторию частиц жидкости.

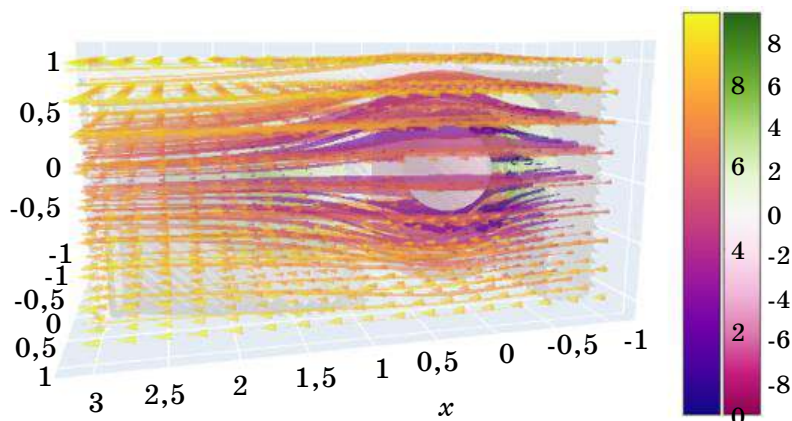


Рис. 1. Обтекание шара

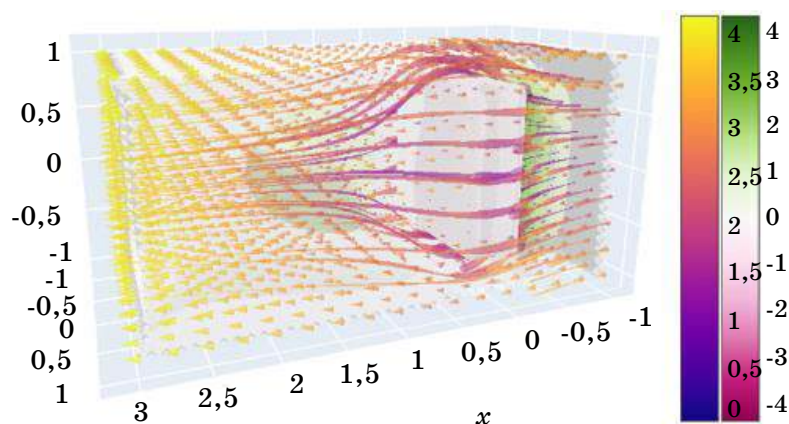


Рис. 2. Обтекание параллелепипеда

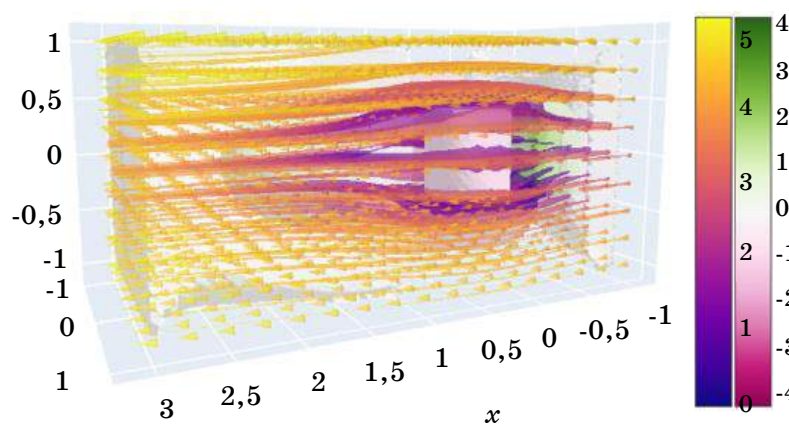


Рис. 3. Обтекание цилиндра, повернутого вдоль оси  $z$

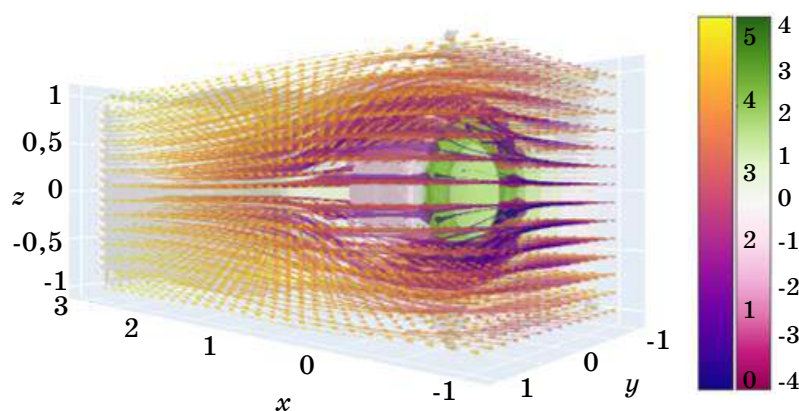


Рис. 4. Обтекание цилиндра, повернутого вдоль оси  $x$

#### Оптимизация времени компьютерных вычислений

Кроме непосредственного улучшения алгоритма работы программы, есть еще ряд аспектов, на которые можно обратить внимание, в частности, на вопросы хранения и обработки данных и скорость вычислений. На каждом шаге вычислений производится обсчет значений для 153467 элементов, включающий в себя еще некоторое число вложенных шагов (как, например, для вычисления давления в условиях сходимости).

На первый взгляд кажется логичным представить сетку с четырьмя элементами в каждой ячейке как четырехмерный массив, где каждо-

му неизвестному отводится свой уровень. Однако для компьютера такой способ не является оптимальным. Даже простое "вытягивание" четырехмерного вектора в одномерный, где все величины фактически идут подряд друг за другом, покажет значительно лучшее время. В качестве примера сравним время выполнения функции программы для сферы с многомерным вектором и с одномерным на двадцати шагах без применения параллельности: в первом случае выходит 146 секунд, во втором — 43 с. Время сократилось примерно в 3,4 раза благодаря "понижению" уровня формата хранения данных.

Для программы с большим объемом вычислений также целесообразно искать возможность



распараллеливания, то есть переноса части расчетов на графический процессор, который обрабатывает их намного эффективнее, чем предназначенный для выполнения последовательных процессов центральный процессор. Но сначала необходимо убедиться, что это возможно для программного и аппаратного обеспечения — блоки не должны быть напрямую связаны друг с другом или зависеть от результата выполнения предыдущего блока, а вычислительная машина должна поддерживать выполнение нескольких процессов или потоков. С компьютерной архитектурой все просто, так как возможность распараллеливания является обязательным условием продолжения работы с программно-аппаратной архитектурой параллельных вычислений *CUDA* [11].

Далее приведены результаты расчетов, проведенных на базе видеокарты *Nvidia GeForce RTX 2060*. С программной точки зрения, если задуматься над последовательностью необходимых для моделирования шагов, можно заметить, что текущее решение уравнения Навье-Стокса зависит от предыдущего шага. Однако, если разобрать вычисления на более мелкие шаги, то можно найти не зависящие друг от друга процессы. Например, в *CUDA* на одном временном интервале расчет производной происходит не менее 33 раз, при этом входные данные никак не изменяются. Данные обстоятельства делают возможным распараллеливание функции нахождения производной.

Если перенести расчет функции на графическую память, на 20 шагах решение находится за 20 сек для четырехмерного случая и за 11 сек для одномерного. Полное время выполнения программ составляет приблизительно 28 мин в первом случае и 5 мин во втором. Таким образом, программа ускорена почти в 6 раз.

Стоит заметить, что для подобной программы время выполнения не является более важной характеристикой, чем точность, однако предложенное улучшение заметно упрощает стадии разработки, тестирования и редакции модели, позволяя быстрее получать промежуточные и финальные результаты и отслеживать неточности.

### Заключение

В данной работе представлена теоретическая модель обтекания тела жидкостью, конкретная практическая задача сравнения результатов и оценки точности модели не решалась. Предложенная модель может применяться в сложных задачах в сфере обучения, включающих в себя моделирование физических процессов, а также для моделирования движения роботов или других несложных геометрических объектов под водой, где не требуется большая точность и мгновенное выполнение расчетов. Однако, чем большая точность будет требоваться от модели,

тем больше ресурсов понадобится для обработки больших объемов данных [12—15].

Затраты на вычисления такого объема особенно заметны в сравнении. Для ускорения компьютерных вычислений можно перенести расчет производной на графический процессор, однако есть и другие части программы, которые можно оптимизировать. Так, вычисление давления, скорости и некоторых промежуточных величин обращаются к производной несколько раз для получения одного значения, при этом входной набор данных не меняется, т. е. вычисления могут быть выполнены одновременно. Ускорение также можно получить путем перехода от одномерных векторов к одномерным динамическим массивам, но при этом не будет такого большого скачка в значениях, как при переходе от четырехмерных векторов к одномерным.

Описание движения жидкости устроено таким образом, что, имея базу, определяющую зависимости между ключевыми величинами, например, как в предложенной модели, становится возможным расширить ее дополнительными зависимостями для конкретно поставленной задачи, добавив термодиффузию, движение многокомпонентных смесей жидкостей и т. д. Кроме того, на основе уравнений Навье-Стокса возможно моделировать поведение плазмы и межзвездного газа.

В ближайшей перспективе планируется доработка модели и добавление возможности обрабатывать сложные трехмерные объекты, импортированные из *Blender* и *AutoCAD*, а также дальнейшее сокращение времени компьютерных вычислений через распараллеливание расчетов.

*Финансирование: исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы "Приоритет 2030" (№ 075-15-2023-235 от 13.02.2023).*

### Литература

1. Doering C. R. The 3D Navier-Stokes Problem // Annual Review of Fluid Mechanics. 2009. V. 41. P. 109—128.
2. Guidoboni G., Guidorzi M., Padula M. Continuous Dependence on Initial Data in Fluid-Structure Motions // J. Mathematical Fluid Mechanics. 2012. V. 14. P. 1—32.
3. Tao T. Quantitative bounds for critically bounded solutions to the Navier-Stokes equations. 2021.
4. Batchelor G. K. An Introduction to Fluid Dynamics. — Cambridge, UK: Cambridge university press, 2000.
5. Hou T. Potentially Singular Behavior of the 3D Navier-Stokes Equations // Foundations of Computational Mathematics. 2002.
6. Hinch E. J. Hydrodynamics at Low Reynolds Numbers: A Brief and Elementary Introduction. 1988.
7. Wittwer P. On the Structure of Stationary Solutions of the Navier-Stokes Equations // Communications in Mathematical Physics. 2002. V. 226. P. 455—474.

8. Жиленков А. А. Численное моделирование процессов переноса в реакторах газозной эпитаксии с аппроксимацией в пространствах аналитических функций // Двойные технологии. 2018. № 2(83). С. 66—68.
9. Siddharthan G. Analytical study of non-Newtonian fluid and Navier-Stokes equations // International J. Scientific Research in Engineering and Management. 2023. V. 07.
10. Temam R. Navier-Stokes equations: theory and numerical analysis // Roger Temam — North-Holland Pub. Co., New York. 1977. P. 464—479.
11. Сандерс Д., Кэндрот Э. Технология CUDA в примерах. Введение в программирование графических процессоров / пер. с англ. Слинкина А. А. — М.: ДМК Пресс, 2013.
12. Slepova L. O., Zhilenkov A. A. Approximating the solution of thermal conductivity problem for composite medium // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, Saint Petersburg — Moscow, 28—30 January 2019. — Saint Petersburg — Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 353—355.
13. Firsov A., Zhilenkov A. Construction of an algorithm for the analytical solution of the Kolmogorov-Feller equation with a nonlinear drift coefficient // Vibroengineering Procedia, Kaunas, 26—28 September 2019. 2019. V. 26. P. 94—99.
14. Harris M. J. Fast Fluid Dynamics Simulation on the GPU // In GPU Gems, Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics Forum 2002. 2002. V. 22(3). P. 401—420.
15. Жиленков А. А., Черный С. Г. Извлечение информации из BigData с помощью нейросетевых архитектур как сетей ассоциаций информационных гранул // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2022. Т. 72. № 3. С. 81—90.

## IMPLEMENTATION OF AN EFFECTIVE ALGORITHM FOR COMPUTER SIMULATION OF FLUID FLOW AROUND BODIES BASED ON THE NAVIER-STOKES EQUATIONS AND CUDA TECHNOLOGIES

A. A. Zhilenkov, P. E. Tsareva

Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

*Numerical modeling is increasingly used in solving complex engineering problems, allowing accurate calculations to predict the behavior of objects and processes without the cost of actual implementation. Considerable progress has been made in the field of fluid modeling, however, finding solutions to the Navier-Stokes equations in three dimensions is still a challenge. In this article, based on the equations, a numerical solution is proposed, a mathematical model of fluid flow around a body, the results and optimization of computational processes are demonstrated.*

**Keywords:** fluid modeling, Navier-Stokes equations, numerical solution, fluid flow around bodies, CUDA.

---

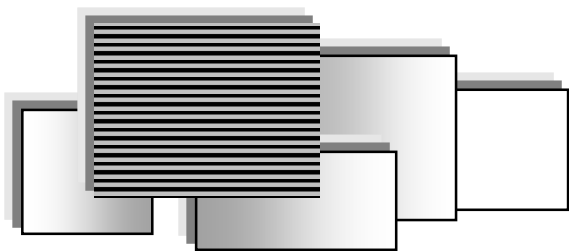
Жиленков Антон Александрович, доцент, декан факультета "Цифровые промышленные технологии".

E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

Царева Полина Евгеньевна, инженер кафедры "Киберфизические системы".

E-mail: tsariovape@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2023 г.



## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 62-52:004.94

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_4\_46

EDN: SARAHU

### АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ

А. И. Сергеев, д-р техн. наук; С. А. Гуньков; Е. М. Езерская, канд. пед. наук;  
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

А. Н. Попов

Оренбургский филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный институт путей сообщения»,  
г. Оренбург, Россия

*Рассматривается применение кубических генетических алгоритмов для проектирования транспортной системы промышленного предприятия. Подобрана математическая модель задачи, призванная описать процесс временных затрат наиболее точным образом. Для определения конкретных параметров модель сведена к оптимизационной задаче, подбор решений для которой осуществлен посредством применения кубического алгоритма. Получен укрупненный алгоритм параметрического синтеза, позволяющий оптимизировать параметры транспортной системы предприятия.*

**Ключевые слова:** транспортная система, параметрический синтез, кубический генетический алгоритм, алгоритм параметрического синтеза.

В последние годы в нашей стране наблюдается заметная тенденция к интенсивному увеличению промышленного производства. Многие современные концепции построены на принципах бережливости, оптимальности и максимальной продуктивности [1].

В рамках отмеченных принципов разрабатывают и внедряют новые технологии, призванные увеличить выпуск промышленной продукции, сократить время ее производства и повысить качество. В ряде работ [2—5] отмечено, что для достижения высокой производственной эффективности необходимо не только совершенствовать технологию выпуска продукции, но и избавляться от всех видов потерь времени на производстве.

Значительная часть таких потерь связана с внутризаводской транспортировкой заготовок к технологическому оборудованию и, в частности, к металлообрабатывающим станкам. Несогласованность транспортных потоков внутри производственного предприятия приводит к простоям оборудования и избыточному накоплению запасов, что снижает скорость выпуска продукции и приводит к неэффективному использованию материальных ресурсов.

Проблема повышения эффективности транспортной системы промышленного предприятия нашла свое отражение в ряде работ. Например, в [6] разработана и проанализирована структура транспортной системы промышленного предприятия, произведена оценка влияния внутризаводской транспортной логистики на величину простоев оборудования, сделаны выводы о высокой значимости проектирования транспортных потоков на предприятии.

В работе [7] рассмотрен процесс проектирования системы регулирования транспортных потоков предприятия с точки зрения диверсификации деятельности. Показано, что чем более различаются между собой промышленные операции, тем более сложная транспортная структура должна их обслуживать.

В исследовании [8] упор сделан на проектирование структуры транспортных маршрутов при внедрении новой технологии на действующем производстве. Показана сложность структурного синтеза маршрутов под новые условия, и предложен алгоритм решения подобных задач. Он заключается в оценке маршрутов по старым и новым условиям и выбор наилучшего из них на основе алгоритма Дейкстры.

Таким образом, проблема проектирования транспортных потоков является актуальной.

### Математическая постановка задачи

Как правило, современные внутризаводские транспортные системы представлены AGV-тележками (AGV — Automatic Guided Vehicle — автоматически управляемый транспорт).

AGV-тележка представляет собой транспорт с электрическим приводом, маршрут же, обычно, строится заранее системой RMS (RMS — Robotic Management System — роботизированная система управления логистикой) [9].

Благодаря тому, что платформа является автономной, для ее управления не нужно отдельного оператора. AGV оснащается необходимыми для навигации датчиками и блоками управления, обеспечивающими функционирование транспортной системы.

Рассмотрим транспортную систему производственного предприятия. Ее функции заключаются в доставке грузов (заготовок, полуфабрикатов) к станкам и обеспечении минимальных простоев в их работе.

Схематично процесс транспортного снабжения на предприятии приведен на рис. 1.

Каждый станок имеет свои особенности, что существенно влияет на его производительность. При этом используются различные формулы расчета времени операций. Для учета временных затрат будем использовать формулу для определения операционного времени:

$$T_o = t_{mach} + (t_a + \Delta t_a) + (t_{ri} + \Delta t_{ri}), \quad (1)$$

где  $T_o$  — операционное время, мин;

$t_{mach}$  — машинное время работы станка, заключающееся в сумме времени, затраченного на все движения и операции, производимые станком, мин;

$t_a$  — вспомогательное время для подготовки производства партии деталей за смену, отнесенное к одной обработанной детали, мин;

$\Delta t_a$  — погрешность вспомогательного времени, мин;

$t_{ri}$  — время для снятия и установки детали, мин;

$\Delta t_{ri}$  — погрешность времени для снятия и установки детали, мин.

Машинное время работы станка определяется исходя из управляющей  $t_{up}$  программы и времени на смену инструмента  $t_{tool}$ :

$$t_{mach} = t_{up} + \sum_{l=1}^L t_{tool}, \quad (2)$$

где  $l = 1, \dots, L$  — количество смен инструмента в операции.

Совокупность производственного цикла равна сумме операционного времени за смену  $\sum_{i=1}^N T_{oc}$ , где  $N = n_1 k_1 + n_2 k_2 + \dots + n_j k_j$  количество операций умноженное на количество деталей.

Каждый станок  $m_j$  имеет две характеристики расстояния: расстояние до следующего (с точки зрения выполнения технологических операций) станка  $s_{mi+1}$  и расстояние до склада с заготовками  $s_{si}$ . Количество перемещений  $q_j$  можно представить, как сумму  $q_{gm} + q_{gs}$ , где  $q_{gm}$  — количество перемещений от разных станков, а  $q_{gs}$  — количество перемещений со склада.

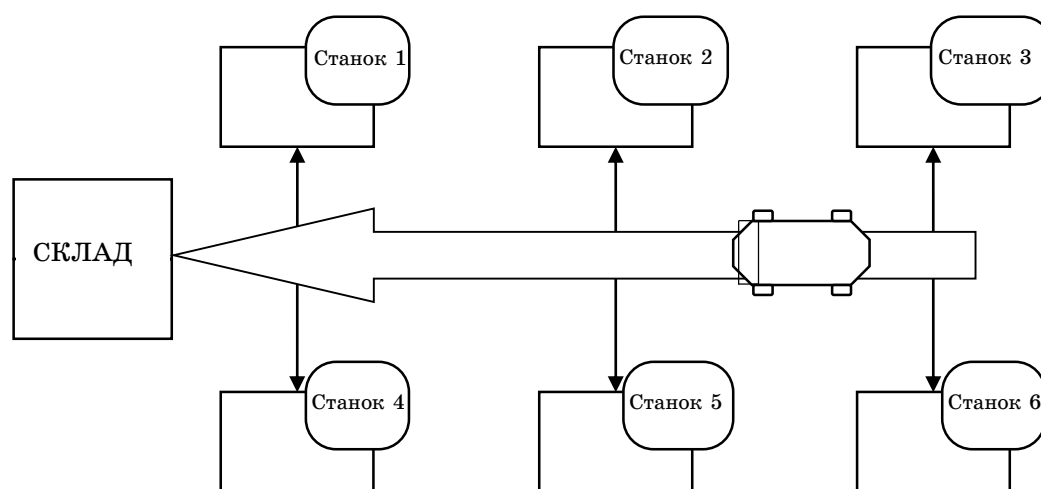


Рис. 1. Схема транспортировки заготовок

Тогда для оценки времени доставки продукции за смену по внутренней транспортной системе предприятия можно использовать следующую формулу:

$$t_{di} = \frac{2s_{mi}q_{gm} + 2s_{si}q_{gs}}{q_v q_p (v_d + \Delta v_d)(w_d + \Delta w_d)} + 2t_{pi}(q_{gm} + q_{gs}), \quad (3)$$

где  $q_{gm}$  — количество перемещений от станков за смену, ед.;  
 $q_{gs}$  — количество перемещений со склада за смену, ед.;  
 $s_{mi}$  — среднее расстояние от станка до станка, м;  
 $s_{si}$  — среднее расстояние от склада до станка, м;  
 $q_v$  — количество транспортных средств, шт.;  
 $q_p$  — количество мест в транспортном средстве, ед.;  
 $v_d$  — скорость перемещения транспортного средства, м/с;  
 $\Delta v_d$  — погрешность скорости перемещения транспортного средства, м/с;  
 $w_d$  — ускорение перемещения транспортного средства, м/с<sup>2</sup>;  
 $\Delta w_d$  — погрешность ускорения перемещения транспортного средства, м/с<sup>2</sup>;  
 $t_{pi}$  — время, затрачиваемое на загрузку/выгрузку транспортного средства, с.

Предложенное уравнение (3) может являться основой для оценки эффективности транспортной системы, однако его необходимо переформулировать с точки зрения задачи оптимизации.

Для постановки задачи оптимизации необходимо задать целевую функцию, которая представляет собой функцию многих переменных и с помощью которой дается математическое изложение цели задач.

Основная проблема постановки задачи оптимизации заключается в выборе критериев оптимальности, что требует глубокого анализа сущности решаемой задачи.

Помимо функции и критериев необходимо определить метод оптимизации, т. е. набор шагов для подбора наилучшего соотношения целевой функции при заданных критериях оптимальности.

Целевая функция формулируется по результатам моделирования с учетом уравнения (3): необходимо минимизировать время простоев, потому функция времени цикла  $t_c$  примет вид:

$$t_c \rightarrow \min. \quad (3)$$

Систему критериев определяют согласно формуле (2). Необходимо отметить, что ряд параметров неизменяем в рамках решения задачи, к ним относятся показатели количества перемещений, а также все расстояния, т. е. ( $q_{gm}$ ,  $q_{gs}$ ,  $s_{mi}$ ,

$s_{si}$ ) = const. Изменяемые параметры: время загрузки/выгрузки  $t_{pi}$ , скорость  $v_d$ , количество мест  $q_p$ , ускорение/замедление  $w_d$ . Как ограничение в работе предполагается использование одноярусного складского помещения. Изменению подлежит, также, один параметр структуры транспортной системы: количество тележек  $q_v$ .

Все остальные параметры имеют минимум и максимум, которые и являются ограничениями для оптимизации. Технические ограничения для используемых AGV-тележек описаны в работах [10–11].

Существует множество методов поиска оптимальных решений, однако, одними из универсальных являются эволюционные методы оптимизации, в частности, генетические алгоритмы (ГА) [12].

### Применение генетических алгоритмов

Применению ГА в оптимизации посвящены многие работы [13–17], в них показана высокая результативность применения данного метода. Обзор источников [18, 19] показывает, что методы ГА продолжают развиваться и совершенствоваться.

У ГА существует один существенный недостаток: алгоритм может сходиться в локальном экстремуме к однородной популяции. На сегодня существует несколько способов устранения данной проблемы, например, использование структурированных алгоритмов или применение многопараметрической селекции. Также, для устранения указанной проблемы можно применять клеточные генетические алгоритмы (КГА), в которых индивиды популяции взаимодействуют исключительно с соседними индивидами.

Одним из видов КГА является кубический алгоритм. Процесс выбора особей из массива  $4 \times 4 \times 4$  приведен на рис. 2.

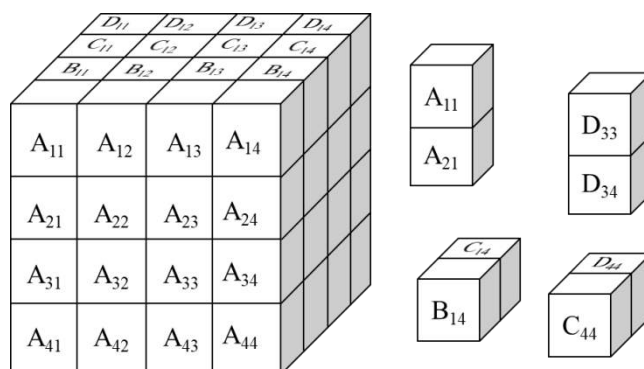


Рис. 2. Процесс выбора особей из массива  $4 \times 4 \times 4$

В статье [20] приведено описание непрерывного ГА, на основе которого разработан алгоритм и для данной работы. Изначальный выбор исходной популяции ГА для параметрического



синтеза выполнен путем случайного определения значений изменяемых параметров в заданной области значений. Хромосомы алгоритма представляют собой совокупность параметров, подлежащих синтезу. Формула для определения популяции имеет вид:

$$H^0 = \begin{bmatrix} h_1^0 \{q_v; q_p; t_{pi}; v_d; w_d\} \\ h_2^0 \{q_v; q_p; t_{pi}; v_d; w_d\} \\ \dots \\ h_i^0 \{q_v; q_p; t_{pi}; v_d; w_d\} \end{bmatrix}, \text{ при } i = 1 \dots N_h, \quad (4)$$

где  $h_i^0$  —  $i$ -я хромосома популяции, содержащая параметры (гены) транспортной системы начального поколения работы ГА;

$N_h$  — число хромосом в популяции (равно 100 хромосомам), ед.

Укрупненный алгоритм параметрического синтеза транспортной системы методом ГА приведен на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм параметрического синтеза транспортной системы предприятия

## Заключение

В результате проведенного исследования определено, что неоднородные ГА обладают определенным преимуществом в процессе поиска решения; при этом наиболее эффективными себя показывают кубические алгоритмы с независимым распределением вероятности мутации генов. Предложены математические модели расчета эффективности производственного цикла предприятия, особое внимание уделено его транспортной системе. Для оптимизации транспортной системы задана целевая функция и предложен кубический ГА, осуществляющий подбор параметров транспортной системы на основе поддержания генетического разнообразия.

## Литература

1. Гуньков С. А., Акимов С. С. Разработка программного продукта для построения карты создания ценности // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 204—209.
2. Михайлов К. Д. Повышение эффективности организации производства на предприятии // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 6—1(76). С. 179—182.
3. Акимов С. С., Трипкош В. А. Производственные процессы в карте потока создания ценностей // Актуальные проблемы экономической деятельности и образования в современных условиях: сб. науч. трудов XIII Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург, 25 апреля 2018 г. — Оренбург: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-инновационный центр", 2018. С. 235—239.
4. Агафонова М. С., Торба Е. К., Морозова В. В. Совершенствование производственного процесса на предприятии // Научно-методический электронный журнал "Концепт". 2017. Т. 2. С. 447—450.
5. Акимов С. С., Жумашева Б. К. Минимизация временных потерь на производстве при построении карт потока создания ценности // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 6. С. 83—85.
6. Ходоскина О. А., Анасович В. Д., Хилькевич А. И. Роль транспортной логистики в деятельности промышленного предприятия // Наука на прогресс транспорту. 2019. № 2(80). С. 49—59.
7. Кузьмина М. Г., Лузгина О. А. Диверсификация деятельности промышленных предприятий: проблемы и модели управления // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2019. № 3(31). С. 29—38.
8. Фастыковский А. Р., Никитин А. Г., Беляев С. В., Добрянский А. В. Особенности освоения технологии прокатки-разделения на действующем непрерывном мелкосортном стане // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 5. С. 313—317.
9. Трипкош В. А., Акимов С. С. Программно-аппаратная система управления робототехническим комплексом // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: сб. мат. Всерос. науч.-метод. конф., Оренбург, 26—27 января 2022 г. — Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2022. С. 1470—1474.
10. Бакланов Б. Р., Бабинецкий С. Г. Оптимизация системы AGV тележек с помощью цифрового двойника // Chronos. 2022. Т. 7. № 6(68). С. 41—44.

11. Abzhapbarova A. Zh., Mussaliev R. D. Features of using AGV technology in the warehouse // Вестник университета Туран. 2021. № 1(89). С. 104—109.
12. Сергеев А. И., Корнипаев М. А., Шамаев С. Ю., Попов А. Н. Применение неоднородных клеточных генетических алгоритмов для параметрического синтеза гибких производственных систем // Автоматизация в промышленности. 2022. № 11. С. 54—57.
13. Гладков Л. А., Гладкова Н. В., Громов С. А. Модифицированный генетический алгоритм для решения задач оперативного планирования // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2016. № 4(28). С. 1—8.
14. Курейчик В. М., Гогохия Л. Р. Решения задачи коммивояжера с применением генетического оператора старения: тр. Междунар. науч.-техн. конгресса "Интеллектуальные системы и информационные технологии—2020" ("ис & ит-2020", "IS&IT'20"): Науч. изд.: в 2-х т., Дивноморское, 02—08 сентября 2020 г. Т. 1. — Дивноморское: Изд-во Ступина С. А., 2020. С. 7—17.
15. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. — М.: Горячая линия – Телеком, 2013. — 384 с.
16. Сочнев А. Н. Планирование производства на основе управляемой генетическим алгоритмом имитационной модели // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 2. С. 233—243.
17. Сергеев А. И., Русяев А. С., Корнипаев М. А., Попов А. Н. Исследование генетических алгоритмов параметрического синтеза высокоавтоматизированных производственных систем // Автоматизация в промышленности. 2022. № 1. С. 13—17.
18. Ершов В. В. Перспективные модели генетических алгоритмов в задачах оптимизации нейронных сетей // Перспективы науки. 2022. № 8(155). С. 21—25.
19. Гуныков С. А., Сергеев А. И. Обзор решений для имитационного моделирования производственных участков // Школа-семинар молодых ученых и специалистов в области компьютерной интеграции производства, Оренбург, 17 ноября 2022 г. — Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2022. С. 216—218.
20. Сергеев А. И., Русяев А. С., Кузнецова В. Б. Генетический алгоритм синтеза технических параметров производственного оборудования // СТИН. 2014. № 3. С. 29—34.

## ALGORITHM FOR PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE ENTERPRISE TRANSPORT SYSTEM

A. I. Sergeev, S. A. Gunkov, E. M. Ezerskaya  
Orenburg State University, Orenburg, Russia

A. N. Popov

Orenburg branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
"Samara State Institute of Railways", Orenburg, Russia

*The article discusses the application of cubic genetic algorithms for the design of the transport system of an industrial enterprise. A mathematical model of the problem has been selected, designed to describe the process of time expenditure in the most accurate way. To determine specific parameters, the model is reduced to an optimization problem, the selection of solutions for which is carried out through the use of a cubic algorithm, and an enlarged parametric synthesis algorithm is obtained that allows optimizing the parameters of the enterprise's transport system.*

**Keywords:** transport system, parametric synthesis, cubic genetic algorithm, parametric synthesis algorithm.

Сергеев Александр Иванович, директор АКИ ОГУ.

E-mail: alexandr\_sergeew@mail.ru

Гуныков Сергей Алексеевич, аспирант кафедры "Системы автоматизации производства".

E-mail: Roughest56@gmail.com

Езерская Елена Михайловна, доцент кафедры "Летательные аппараты".

E-mail: ezerskaya-e.m@mail.ru

Попов Анатолий Николаевич, директор.

E-mail: a.n.popov@origt.ru

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2023 г.

УДК 621.9.015

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_4\_51

EDN: SGAVXN

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФРЕЗЕРНЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А. Н. Феофанов, д-р техн. наук; И. Е. Колошкина

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
Москва, Россия

*Изложены результаты изучения авторами вопроса применимости элементов искусственного интеллекта модуля SAM Expert системы ADEM для автоматизации процессов проектирования фрезерных операций на станках с ЧПУ. Разработан способ назначения условий для 2.5-координатного фрезерования объемных изделий на станках с ЧПУ для плоского фрезерования. Предложены приемы оптимизации режимов резания по толщине стружки при контурном фрезеровании с переменным припуском. Показан способ определения условий плунжерного фрезерования для обеспечения заданного качества обработанной поверхности. Приведен пример автоматизации процессов проектирования фрезерных операций для станков с ЧПУ при подготовке производства детали "Плита" пресс-формы для термопластавтомата.*

**Ключевые слова:** фрезерная обработка на станках с ЧПУ, автоматизированная подготовка технологической документации, программирование для станков с ЧПУ в САМ-системе, искусственный интеллект.

На современном этапе развития обрабатывающей промышленности большое внимание уделяется вопросам производительности труда. Исследования, способствующие ее повышению, особенно актуальны в соответствии с положениями российского Национального проекта "Производительность труда" [1]. Одним из способов повышения производительности труда при обработке изделий является использование возможностей автоматизированных систем для подготовки управляющих программ для станков с числовым программным управлением (САМ-систем).

Оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ) обеспечивает очень высокую гибкость производства. Такое оборудование можно быстро настроить на новый вид изделия. Значительным преимуществом станков с ЧПУ является простота их интеграции в системы "умного" производства Индустрии 4.0, а также их высокая эффективность. Использование станков с ЧПУ позволяет сократить количество рабочих на 25–80 %, повысить производительность труда до 50 %, в 2–3 раза увеличить точность изготовления детали [2]. Однако такое оборудование является весьма дорогостоящим и требует планирования производства высококвалифицированными сотрудниками, разработки эффективных технологий и управляющих программ. Все преимущества применения оборудования с программным управлением невозможны без соответствующей технологической подготовки производства, реализация которой выполняется с помощью автоматизированных систем проектирования.

Существенным вкладом в совершенствование автоматизированного проектирования технологий и программ для станков с ЧПУ является ис-

пользование при работе в САМ-системе элементов искусственного интеллекта (ИИ). Искусственный интеллект — это способность компьютера обучаться, принимать решения и выполнять действия, свойственные человеческому интеллекту [3]. При проектировании технологической документации реализуются такие элементы ИИ, как автоматическое распознавание конструктивных элементов по 3D-модели детали, подготовка порядка выполнения операции по технологическим переходам, расчёт траектории перемещения инструмента, формирование комплекта технологической документации и управляющей программы для оборудования с ЧПУ. Задача технолога заключается в том, чтобы в режиме диалога с САМ-системой установить ограничения по точности и шероховатости поверхности, обозначенные на чертеже. Такой подход позволяет сократить время участия человека в проектировании и значительно уменьшить время подготовки производства для изготовления изделия.

### Подходы к автоматизации процессов технологической подготовки производства для станков с ЧПУ

Подготовка производства на этапе разработки комплекта технологической документации выполняется на предприятиях с различной степенью цифровой автоматизации. Самое простое применение компьютерной техники заключается в последовательном "ручном" заполнении на персональном компьютере заранее подготовленных шаблонов технологических документов. Более эффективным является использование программных средств для цифровой автоматизации процессов разработки технологической докумен-

тации (ТД), когда технолог в режиме диалога с программой заполняет только карту технологического процесса (КТП), а остальные документы формируются системой автоматически, что позволяет существенно сократить время проектирования [4]. Авторы данной работы сопоставили "ручной" и автоматизированный способы формирования ТД (рис. 1), проанализировали результаты эффективности применения средств автоматизации и сделали вывод, что при автоматизированном заполнении технологической документации время ее подготовки сокращается почти в 5 раз.

Для станков с ЧПУ наиболее сложной частью технологической подготовки производства является разработка управляющих программ. При традиционном программировании технологических операций и переходов в автоматизированных системах разработчик должен поочередно указывать все обрабатываемые контуры и поверхности, а также все контрольные контуры и поверхности, и последовательно вводить необходимые данные по каждому переходу для формирования общего комплекта технологических документов (рис. 2). Такой способ приемлем при

малом числе обрабатываемых конструктивных элементов. При работе с моделями, состоящими из сотен и тысяч поверхностей, подобный процесс становится очень трудоемким. Более того, для каждого технологического перехода требуется вводить большой объем числовых данных — режимы резания, параметры инструмента и т. д. Для устранения указанных недостатков авторы предлагают использовать САМ-систему. Единственной из отечественных систем, в которую включен САМ-модуль (модуль *CAM Expert*) для автоматической разработки управляющей программы и технологической документации для операций, реализуемых на станках с ЧПУ, является интегрированная CAD/CAM/CAPP конструкторско-технологическая система ADEM [5]. В модуле *CAM Expert* значительный объем рутинной работы берет на себя подсистема, в которой применяются элементы ИИ. Авторы данной работы оценили время программирования технологических операций в САМ-системе (см. рис. 2) и сопоставили его со временем программирования на основе последовательной обработки конструктивных элементов (при использовании САМ-системы время сокращается).



**Рис. 1. Способы подготовки комплекта технологической документации:**

КД — конструкторская документация; КТП — карта технологического процесса; ТЛ — титульный лист; ВТД — ведомость технологической документации; ВОБ — ведомость оборудования; ВО — ведомость оснастки; КК — комплект точечная карта



**Рис. 2. Способы программирования технологических операций в САМ-системе:**

УП — управляющая программа; КЭ — конструктивный элемент;  $n$  — количество конструктивных элементов

### Автоматизация процессов технологической подготовки производства в системе ADEM с элементами искусственного интеллекта

Рассмотрим схему реализации режима применения искусственного интеллекта в модуле *CAM Expert* на примере проектирования фрезерных операций для станков с ЧПУ (рис. 3).



Рис. 3. Схема последовательности действий при проектировании фрезерных операций для станка с ЧПУ в модуле *CAM Expert*

Автоматическое технологическое проектирование выполняется на основе созданной или создаваемой объемной модели детали в конструкторском модуле *CAD* (рис. 3, блок 1). Далее в технологическом модуле *CAM/CAPP* запускается *CAM Expert* (рис. 3, блок 2). Затем устанавливаются ограничения параметров работы модуля *CAM Expert* (рис. 3, блок 3) — максимальные размеры сверла и фрезы, ограничения параметров конструктивных элементов (высота и угол наклона КЭ Стенка, максимальный радиус округления сопряжений).

После задания ограничений параметров программа по 3D-модели автоматически выполняет распознавание детали с визуализацией конкретных подлежащих обработке конструктивных элементов и их параметров (рис. 3, блок 4). Затем автоматически формируется маршрут изготовления детали по переходам для каждого конструктивного элемента (рис. 3, блок 5). Содержание каждого перехода включает название, применяемый режущий инструмент, режимы обработки и другую информацию, описывающую реализацию этого перехода.

У технолога есть возможность редактирования предложенных модулем *CAM Expert* параметров обработки детали (рис. 3, блок 6) в диалоговом окне с закладками: **Деталь** (наименование, обозначение, материал, станок), **Заготовка** (форма, размеры и припуск на стороны), **Инструменты** (перечень подобранных системой режущих инструментов), **КЭ** (координаты КЭ и ограничения геометрических параметров), **Переходы** (перечень переходов с указанием режущего инструмента и режимов обработки, геометрических параметров реализуемого перехода). Затем в автоматическом режиме выполняется расчет траектории движения каждого инструмента с учетом внесённых изменений и создаётся управляющая программа (рис. 3, блок 7).

Для оценки соответствия детали чертежу выполняется моделирование ее обработки (рис. 3, блок 8). Полученная заготовка изображается в виде объемной модели, обработанные и необработываемые конструктивные элементы выделяются разным цветом. Рассчитанная траектория движения инструмента через адаптер преобразуется и поступает в текст управляющей программы для станка, выбранного ранее для реализации этой операции. Далее система в автоматическом режиме формирует комплект технологической документации (рис. 3, блок 9), включающий управляющую программу и нормы времени на выполнение операции. Таким образом, в блоке 9 объединены функции технолога, программиста и нормировщика.

### Технологические решения для фрезерной обработки объемных деталей на станках с ЧПУ

Авторы данной статьи провели исследования, в результате которых разработали технологиче-

ские решения для выполнения фрезерных операций на станках с ЧПУ и реализовали их на стадии проектирования в САМ-системе.

В процессе исследований:

1) была выдвинута гипотеза о возможности использовании элементов искусственного интеллекта при проектировании в САМ-системе фрезерных операций для станков с ЧПУ;

2) проведен патентный поиск, который показал, что эти вопросы не получили должного обоснования в научной литературе;

3) с целью выявления взаимосвязей между параметрами обработки и качеством поверхности выполнено компьютерное моделирование зон контакта инструмента с деталью для таких видов фрезерования на станках с ЧПУ как 2.5-координатная обработка, контурная обработка с переменным припуском и плунжерное фрезерование в модуле CAD системы ADEM;

4) проанализированы компьютерные модели и формализованы процессы взаимовлияния параметров обработки на качество обрабатываемой поверхности в виде математических зависимостей;

5) разработаны в *Microsoft Excel* программы расчета математических зависимостей влияния параметров обработки на качество обрабатываемой поверхности для дальнейшего включения в алгоритм автоматического проектирования с использованием элементов искусственного интеллекта;

6) выполнены виртуальные компьютерные эксперименты в модуле CAD системы ADEM и получены графики взаимовлияния параметров обработки и качества поверхности;

7) проведены физические эксперименты по различным видам фрезерования на оборудовании с ЧПУ;

8) сопоставлены результаты расчета и результаты физического эксперимента, подтвердившие адекватность полученных зависимостей;

9) сделаны выводы о возможности автоматического проектирования фрезерных операций для станков с ЧПУ в САМ-системе с использованием элементов искусственного интеллекта, включая выполненные разработки по обеспечению качества поверхности.

Фрезерование объемных моделей, как правило, выполняется на 3—5-координатных станках с ЧПУ. Однако в САМ-системе есть возможность разрабатывать управляющие программы, позволяющие выполнять обработку объемной модели 2.5-координатным фрезерованием на станках для плоской обработки. Это реализуется за счет определения в управляющей программе обрабатываемой поверхности как одного из видов конструктивного элемента и указания величины дискретного перемещения по оси Z. Такой вариант обработки экономически оправдан, так как стоимость нормо-часа при фрезеровании объемного изделия на станке для плоского фрезерования с размером стола 250×400 мм составляет

850 руб., а для фрезерования аналогичного изделия на станке для объемной обработки по трем осям такого же типоразмера — 1450 руб. Следовательно, экономия может достигать 40 % от стоимости нормо-часа [6].

Добиться повышения производительности труда при обработке на станках с ЧПУ возможно благодаря использованию САМ-систем для реализации адаптивного управления процессом контурного фрезерования с переменным по величине припуском в зависимости от качества поверхности. В САМ-системе при разработке управляющей программы можно программировать величину подачи, обеспечивающую постоянство толщины стружки при переменной толщине снимаемого слоя, что позволяет автоматически изменять подачу в зависимости от изменения величины припуска. В работе [7] определены условия для реализации этого решения в зависимости от требований к качеству обрабатываемой поверхности.

При обработке на станке с ЧПУ колодцев, контуров или объемных поверхностей применяется метод плунжерного фрезерования, который заключается в челночном вертикальном движении концевой фрезы в обрабатываемый материал по оси Z. Данный метод используется при вылете инструмента больше чем на  $4 \times D$  фрезы при обработке деталей малой жесткости и углов колодцев с малым радиусом скругления. При программировании плунжерного фрезерования в САМ-системе за счет задания величины дискретного перемещения по осям X и Y при известных параметрах режущего инструмента появляется возможность разрабатывать управляющие программы, обеспечивающие заданные высотные геометрические параметры качества обрабатываемой поверхности, формируемые в виде "гребешка" [8]. Функционалы и функции автоматизированного расчета для реализации таких технологических решений приведены в табл. 1.

Структурная схема движения информации при автоматизированном проектировании фрезерных операций в системе ADEM с учетом результатов выполненных исследований приведена на рис. 4.

Информация об изделии (его объемная 3D-модель) загружается в модуль *CAM Expert* (рис. 4, блок 3), где искусственный интеллект выполняет распознавание конструктивных элементов изделия и формирует шаблон технологического процесса по переходам. Затем выполняется расчет параметров обработки (рис. 4, блок 4) для обеспечения заданной шероховатости поверхности (см. табл. 1). Затем эти параметры и сведения о точности заносятся технологом в разработанный программой технологический процесс. Далее в режиме ИИ автоматически с учетом корректировки данных формируется комплект технологической документации, разрабатывается управляющая программа и определяются нормы времени.



Таблица 1

Функционалы и функции зависимости качества поверхности от параметров обработки при различных видах фрезерования на станках с ЧПУ

Вид фрезерования	Функционал	Функция
2.5-координатное фрезерование объемных изделий на станках с ЧПУ для плоского фрезерования	$R_a(R_z) = f$ (форма режущей части инструмента; форма обрабатываемой поверхности; шаг перемещения инструмента по оси Z)	Для получения заданных параметров шероховатости поверхности на изделии $R_a(R_z)$ : $h_z = 2r_b \sin\{\arccos[1 - h_{гр}/(r_b 10i)]\} \cos \alpha^\circ,$ где: $h_z$ — шаг перемещения инструмента по оси Z, мм; $r_b$ — радиус при вершине режущего инструмента, мм; $\alpha^\circ$ — угол наклона обрабатываемой поверхности заготовки относительно оси Z, град. $h_{гр}$ — требуемое высотное значение неровности (гребешка) в зависимости от параметров шероховатости. $\{h_{гр} = R_z, \text{ при задании параметра } R_z$ $4R_a, \text{ при задании } R_a \text{ и } R_a > 12,5 \text{ мкм};$ $5R_a, \text{ при задании } R_a \text{ и } R_a < 12,5 \text{ мкм};$
Адаптивная стабилизация контурного фрезерования при переменном по величине припуске	$R_a(R_z) = f$ (величины припуска; высота контура; параметры фрезы; скорость резания; удельная сила резания)	Для получения заданных параметров шероховатости поверхности на изделии $R_a(R_z)$ : $a_{\max} = 4 \sqrt{\frac{D h_{гр}}{10^3}} \sqrt{\frac{t_{\min}}{D} - \left(\frac{t_{\min}}{D}\right)^2},$ где $a_{\max}$ — толщина стружки, мм; $D$ — диаметр фрезы, мм; $h_{гр}$ — максимальная высота неровности, мкм; $t_{\min}$ — минимальный припуск, мм.
Плунжерное фрезерование	$R_a(R_z) = f$ (диаметр фрезы; подача по осям X и Y)	Для получения заданных параметров шероховатости поверхности на изделии $R_a(R_z)$ : $S_{xy} = (\sin(\arccos((D/2) - h_{гр}/10i)/(D/2)))D,$ где: $S_{xy}$ — величина однократного перемещения инструмента вдоль обрабатываемой поверхности по осям X и Y, мм; $D$ — диаметр фрезы, мм; $h_{гр}$ — максимальная высота неровности, мкм.

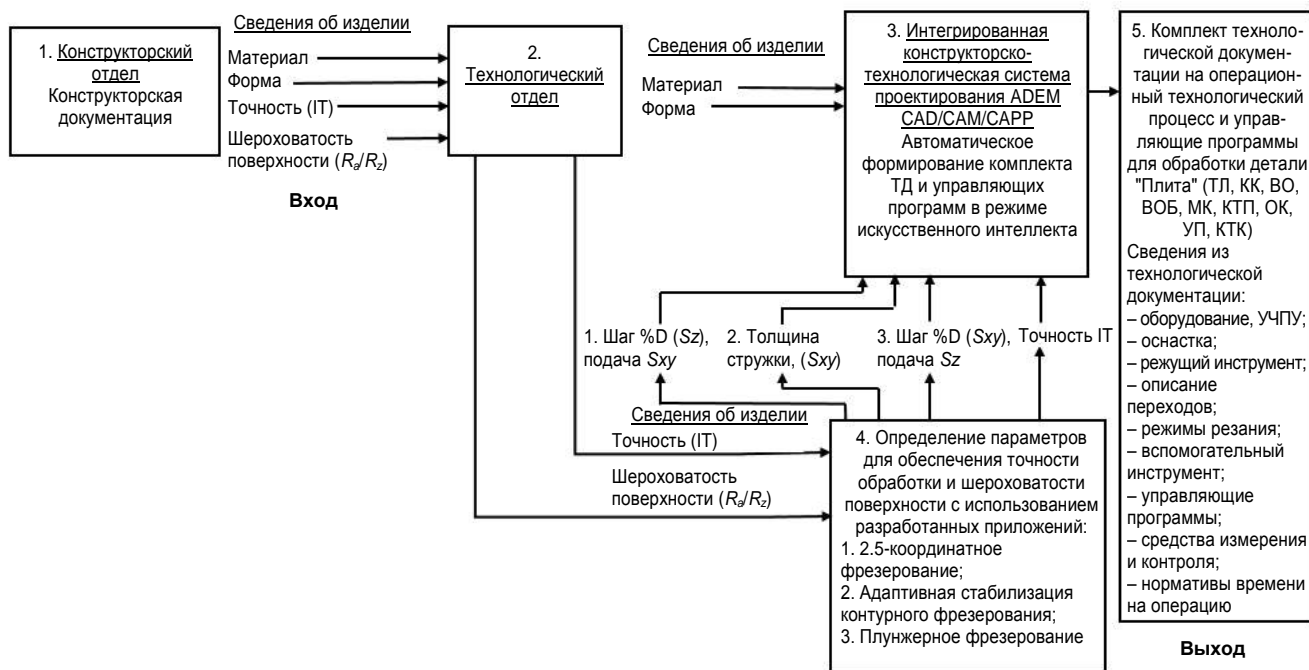


Рис. 4. Движение информации об изделии при автоматизации процесса проектирования фрезерных операций в системе ADEM

**Пример автоматизации процесса проектирования при подготовке производства детали "Плита" пресс-формы для термопластавтомата**

Предложенные выше решения были апробированы при проектировании в САМ-системе технологического процесса обработки детали "Плита" пресс-формы для термопластавтомата (объемные 3D-модели заготовки и детали показаны на рис. 5).

Материал детали — сталь 38ХНЗМН ГОСТ 4547-71, для рабочих поверхностей качество точности IT6, шероховатость  $R_a = 0,80$  мкм, для остальных поверхностей качество точности IT14 и  $R_a = 6,3$  мкм (ГОСТ 27358-87). В конструкции плиты предусмотрены наклонные стенки у 4-х колодцев, что предполагает обработку на 3-х осевом обрабатывающем центре. Однако, как было показано выше, можно изготавливать изделия на станке с ЧПУ для плоского

фрезерования в режиме 2.5-координатной обработки (при подготовке управляющей программы в САМ-системе). Были разработаны два варианта технологического процесса — обработка на 3-х осевом фрезерном станке с ЧПУ для объемного фрезерования и 2.5-координатная обработка на фрезерном станке для плоского фрезерования и проведено сравнение этих вариантов. Технологическая подготовка производства детали "Плита" для пресс-форм на станке с ЧПУ с использованием элементов искусственного интеллекта в модулях CAD/CAM/CAPP системы ADEM проводилась в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 6.

Сравнение вариантов проектирования фрезерных операций показало, что использование фрезерного станка для плоского фрезерования вместо 3-х осевого обрабатывающего центра позволяет в два раза уменьшить стоимость выполнения операций (см. табл. 2).

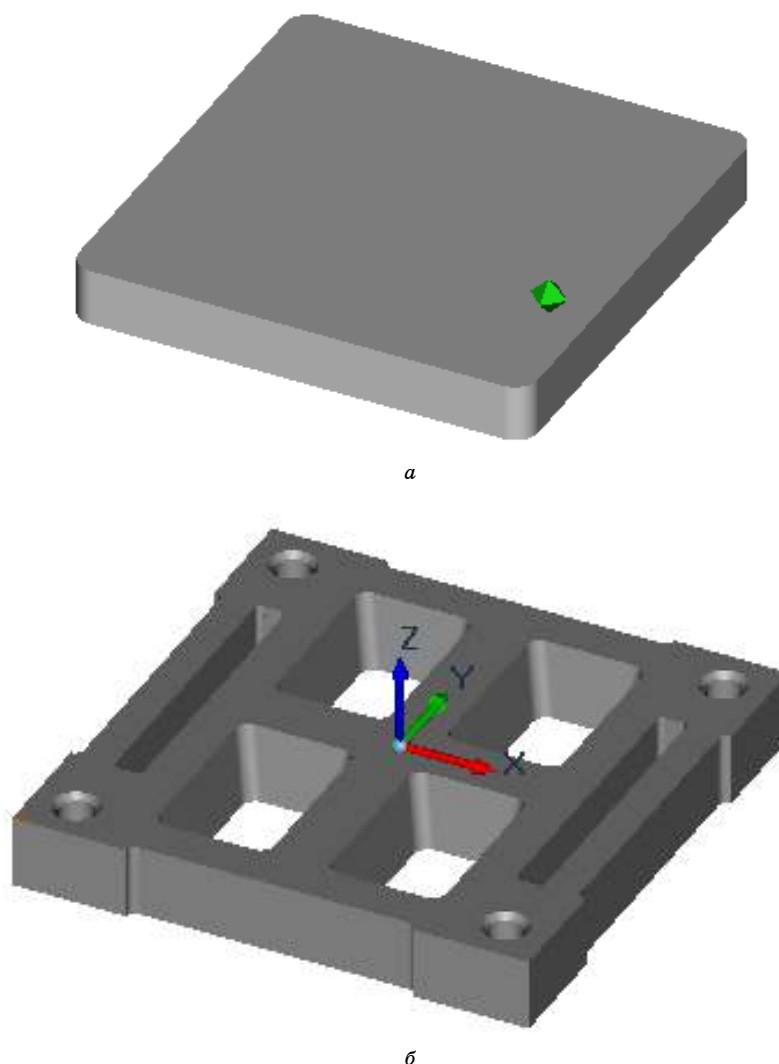
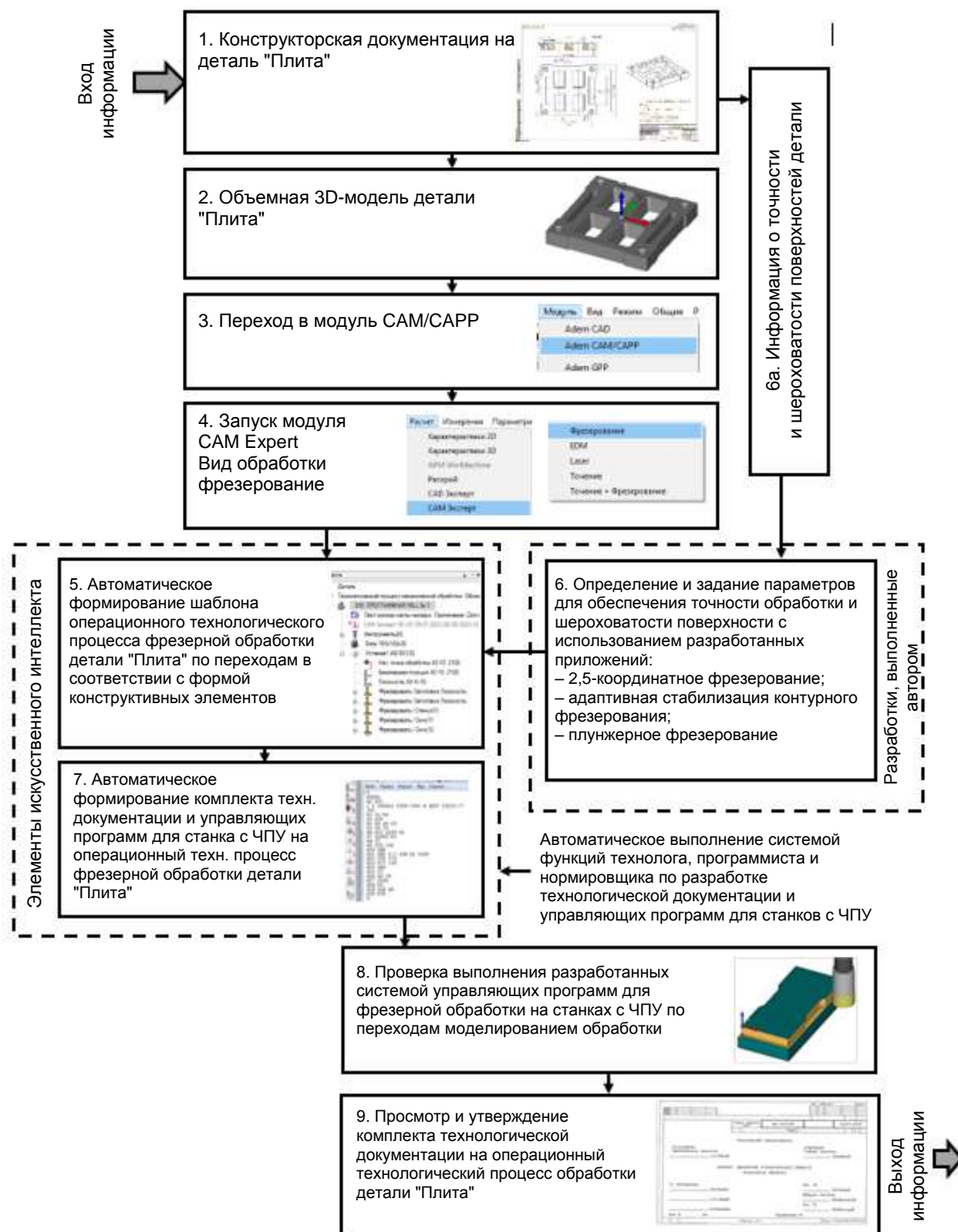


Рис. 5. Объемные 3D-модели заготовки (а) и детали "Плита" (б) пресс-формы для термопластавтомата



**Рис. 6. Алгоритм технологической подготовки производства деталей класса "Плита" для пресс-форм на станках с ЧПУ в системе ADEM с использованием элементов искусственного интеллекта**

Таблица 2

## Технологический процесс (ТП) обработки детали "Плита" на станке с ЧПУ

Базовый ТП. Обработка на 3-х осевом фрезерном станке с ЧПУ для объемного фрезерования		Разработанный ТП. 2.5-координатная обработка на фрезерном станке для плоского фрезерования	
Операция, содержание переходов	Время, мин	Операция, содержание переходов	Время, мин
1	2	3	4
<b>015 Фрезерная с ЧПУ</b>		<b>015 Фрезерная с ЧПУ</b>	
1. Установить заготовку в тисках		1. Установить заготовку в тисках	
2. Фрезеровать 4 колодца по программе (3-х координатная объемная обработка)	52.56	2. Фрезеровать 4 колодца по программе (2.5-координатная обработка)	48.24
3. Фрезеровать 2 окна по программе (3-х координатная объемная обработка)	8.25	3. Фрезеровать 2 окна по программе (плунжерное фрезерование)	5.54
4. Сверлить 4 отверстия диаметром 12 мм	4.00	4. Сверлить 4 отверстия диаметром 12 мм	4.00
<b>020 Фрезерная с ЧПУ</b>		<b>020 Фрезерная с ЧПУ</b>	
1. Установить деталь в приспособление		1. Установить деталь в приспособление	
2. Фрезеровать наружный контур по программе (3-х координатная объемная обработка)	16.28	2. Фрезеровать наружный контур по программе (адаптация обработки по толщине стружки)	10.48
Суммарное время обработки по программе	1.21.09	Суммарное время обработки по программе	1.08.26
Сокращение времени обработки по программе за счёт применения разработанных технологических решений на приведенных операциях составляет <b>16,17 %</b>			
Затраты на выполнение операции через стоимость нормо-часа (1450 руб./час)	1959,67 руб.	Затраты на выполнение операции через стоимость нормо-часа (850 руб./час)	967,01 руб.
Стоимость выполнения операций за счёт использования фрезерного станка для плоского фрезерования вместо 3-х осевого обрабатывающего центра при применении разработанных технологических решений сокращена на <b>50,56 %</b>			

Таким образом, апробация предложенного авторами данной статьи способа назначения условий для 2.5-координатного фрезерования объемных изделий на станках с ЧПУ для плоского фрезерования позволяет сделать следующие выводы:

1. На этапе выполнения проектных работ в модулях CAD/CAM/CAPP системы ADEM:

- автоматическая подготовка технологического процесса и управляющей программы для станка с ЧПУ на основе изображения 3D-модели и расчетных данных о параметрах обработки реализуется с применением элементов искусственного интеллекта;
- сокращаются сроки технологической подготовки производства обработки деталей за счёт комплексного проектирования в модуле *CAM Expert* (в несколько раз по сравнению с традиционным поэлементным проектированием);
- разработанные функциональные зависимости позволяют выполнять расчёт параметров фрезерования, которые на стадии проектирования обеспечивают заданные показатели шероховатости рабочих поверхностей;
- за счёт совмещения технологом обязанностей программиста и нормировщика почти в 2,5 раза сокращаются трудовые ресурсы, привлекаемые для выполнения работ (технолог — 1 условная проектная единица, программист — 1 ед., нормировщик — 0,3 ед.);
- автоматизация процессов проектирования позволяет сократить срок обучения специалистов по подготовке высокотехнологичных проектов обработки.

2. На этапе обработки на станке с ЧПУ:

- снижаются до 40 % затраты на обработку;
- фрезерная обработка в режимах, численные значения которых определяются по зависимостям (см. табл. 1), обеспечивает заданную чертежом шероховатость поверхности изделия;
- повышается производительность выполнения операции контурного фрезерования с переменным припуском за счёт адаптивной стабилизации процесса;
- сокращается ручная доводка отдельных конструктивных элементов за счёт применения плунжерного фрезерования.

### Заключение

Использование элементов искусственного интеллекта при проектировании операций для станков с ЧПУ в САМ-системе позволяет существенно повысить производительность труда технолога при выполнении фрезерных операций на станках с ЧПУ.

Для автоматизации процессов проектирования фрезерных операций для станков с ЧПУ на основе элементов искусственного интеллекта используется отечественное программное обеспечение ADEM CAD/CAM/CAPP, уже применяемое на целом ряде предприятий обрабатывающей промышленности. Это делает возможным широкое использование предлагаемых авторами данной работы технологических решений в реальном секторе экономики. Для подготовки соответствующих специалистов в учебных заведениях среднего профессионального и высшего образования авторами подготовлен учебник [9].

**Литература**

1. Национальный проект "Производительность труда" [Электронный ресурс]. URL: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/nacionalnyy\\_proekt\\_proizvoditelnost\\_truda/?ysclid=lox43c9t2u696588590](https://www.economy.gov.ru/material/directions/nacionalnyy_proekt_proizvoditelnost_truda/?ysclid=lox43c9t2u696588590) (дата обращения: 13.11.2023).
2. Лизан И. Ю. Станковый хребет экономики [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sonar2050.org/storage/files/Доклады/Лизан/Станковый%20хребет%20экономики.pdf>. (дата обращения: 28.07.2023).
3. Financial sector leading the way in using AI, Microsoft report reveals [Электронный ресурс]. URL: <https://news.microsoft.com/en-gb/2019/10/01/financial-sector-leading-the-way-in-using-ai-microsoft-report-reveals> (дата обращения: 28.07.2023).
4. Колошкина И. Е. Автоматизация разработки технологической документации // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 1(173). С. 56—62.
5. ADEM [Электронный ресурс]. URL: <https://adem.ru> (дата обращения: 13.11.2023).
6. Колошкина И. Е. Автоматизация принятия решения о возможности 2.5-координатного фрезерования объемных изделий на станках с ЧПУ для плоской обработки // Автоматизация в промышленности. 2021. № 2. С. 55—60.
7. Колошкина И. Е. Оптимизация режимов контурного фрезерования при программировании для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) в САМ-системе // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. № 2(182). С. 15—19.
8. Колошкина И. Е. Автоматизация определения геометрических параметров качества поверхности при плунжерном фрезеровании на станке с ЧПУ // Автоматизация в промышленности. 2022. № 09. С. 29—71.
9. Колошкина И. Е. Основы программирования для станков с ЧПУ в САМ-системе: учебник. — Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. — 260 с.

## AUTOMATION OF MILLING OPERATIONS DESIGN PROCESSES FOR CNC MACHINES BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE ELEMENTS

A. N. Feofanov, I. E. Koloshkina

Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia

*The article presents the results of the authors' study of the applicability of the artificial intelligence elements of the CAM Expert module of the ADEM system for automating the design processes of milling operations on CNC machines. A methodology for assigning conditions for 2.5-coordinate milling of bulk products on CNC machines for flat milling has been developed. Techniques for optimizing cutting modes by chip thickness during contour milling with variable allowance are proposed. A method for determining the conditions of plunger milling to ensure a given quality of the treated surface is shown. An example of automation of the design processes of milling operations for CNC machines during the preparation of the production of the part "Plate" of the mold for the thermoplastics of the machine is given.*

**Keywords:** milling on CNC machines, automated preparation of technological documentation, programming for CNC machines in a CAM system, artificial intelligence.

---

**Феофанов Александр Николаевич**, профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления.

E-mail: [feofanov.fan1@yandex.ru](mailto:feofanov.fan1@yandex.ru)

**Колошкина Инна Евгеньевна**, соискатель.

E-mail: [inna.koloshkina@yandex.ru](mailto:inna.koloshkina@yandex.ru)

*Статья поступила в редакцию 25 сентября 2023 г.*

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2024 г.**  
**на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»**

Наименование издания	Индекс издания (количество выпусков в год)	Цена 1 экз., руб.	Кол-во выпусков в год	Общая сумма, руб.
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России	4	1600,00		
Конструкции из композиционных материалов	4	1750,00		
Экология промышленного производства	4	1600,00		
Информационные технологии в проектировании и производстве	4	1800,00		
Вопросы защиты информации	4	1800,00		
В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.				

*Поставка журналов подписчикам через издательство осуществляется почтовыми бандеролями с приложением всех необходимых бухгалтерских документов.*

**Наши реквизиты:**

Полное наименование организации: \_\_\_\_\_

Сокращенное наименование организации: \_\_\_\_\_

ИНН/КПП \_\_\_\_\_

ОКПО \_\_\_\_\_

Расчётный счёт № \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_

к/с \_\_\_\_\_ БИК \_\_\_\_\_

Юридический адрес: \_\_\_\_\_

Почтовый адрес: \_\_\_\_\_

Контактное лицо \_\_\_\_\_ тел. \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

*(Для оформления счёта и бухгалтерских документов просьба заполнить все строчки).*

**Справочно:**

Заполненный бланк-заказ просьба отправить по факсу: 8(495) 491-44-80 или

E-mail: [secretariat@ntckompas.ru](mailto:secretariat@ntckompas.ru)

Более подробную информацию об изданиях и подписке можно получить по телефону:

8 (495) 491-43-17

E-mail: [ivleva@ntckompas.ru](mailto:ivleva@ntckompas.ru)

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское шоссе, д.77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».