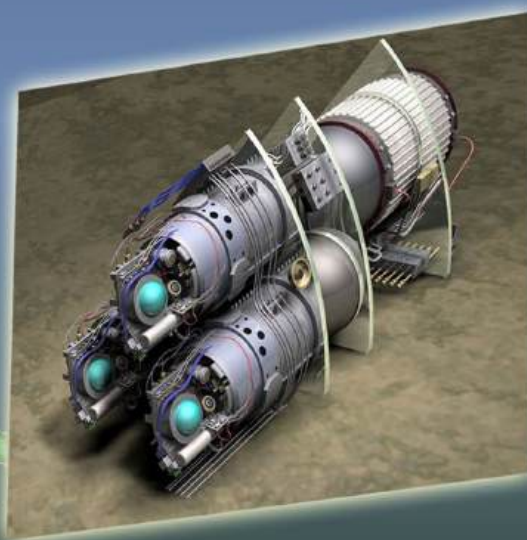
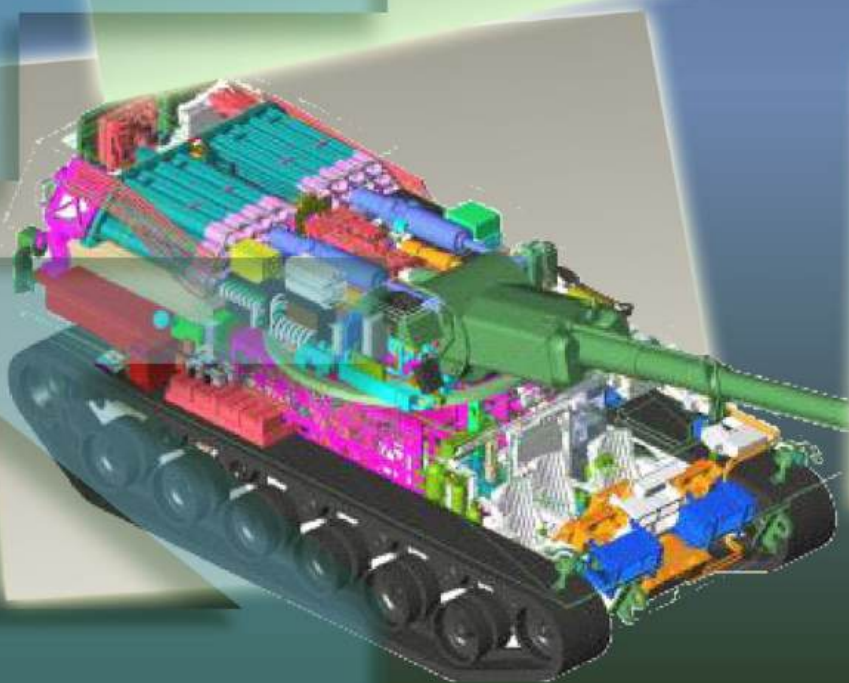
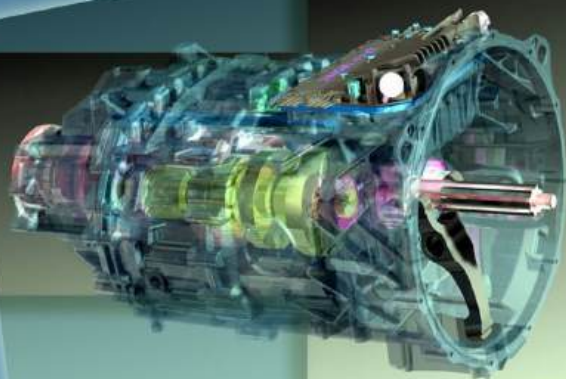
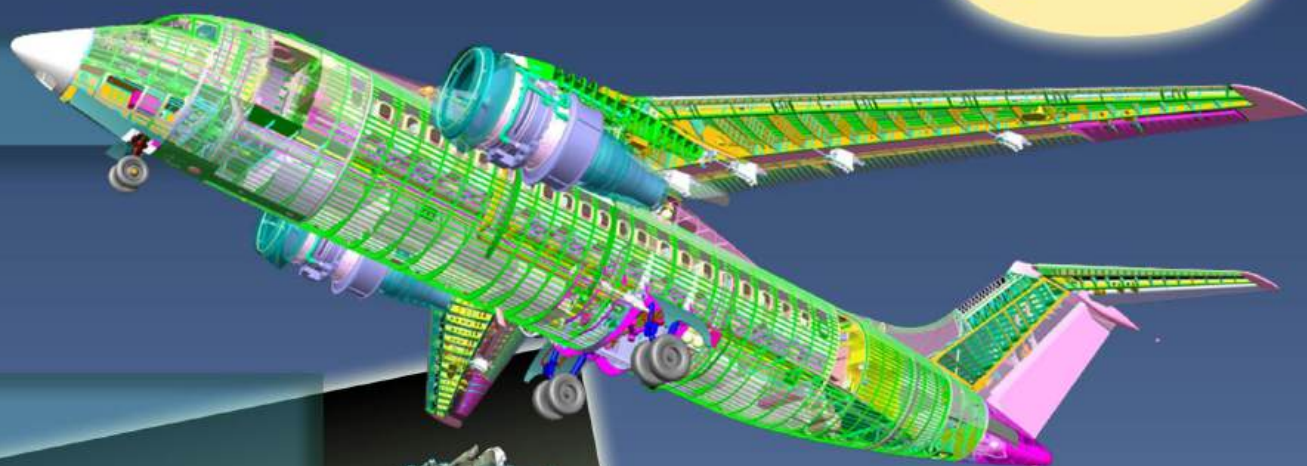


# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 3' 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»

## № 3 (191) 2023

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1976 г.

### Главный редактор

И. А. Шеремет, акад. РАН, проф., заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по научной работе

### Заместитель главного редактора

В. Н. Гридин, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ЦИТИ 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. Цырклов, 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 АИИ 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

Правильщиков П. А. Международная квантово-компьютерная гонка и квантовые информационные технологии. *Часть 1. (Обзор)*..... 3

Соболь В. М., Ударцев И. В. Диалоговое управление экспериментами исследования автоматизированной системы документального обмена..... 19

Сумароков С. В., Кечков А. А., Нетронин И. В., Комиссаров К. В., Повереннов Е. Ю. Реализация интеграции PLM-системы проекта БН-1200 с системой "Урания"..... 31

### Прикладные вопросы и задачи применения информационных технологий

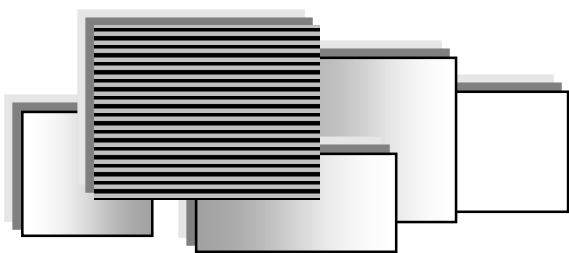
Бутко А. О. Разработка системы управления техническими данными на основе комплекса структурно-параметрического моделирования..... 39

Жданова О. В., Столяров О. Н. Обеспечение качества данных при эксплуатации информационных систем управления требованиями в проектном направлении «Прорыв»..... 48

# **INFORMATION TECHNOLOGY OF CAD/CAM/CAE**

## **THE SCIENTIFIC JOURNAL**

Information on recent advances in CAD/CAM/CAE, industry & business & complex information technology, including methods and tools of computer graphing, geometrical and mathematical modeling, database control methods on estimation and provision of control and reliability.



## ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 681.518.2  
DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_3\_3  
EDN: SVVRRP

### МЕЖДУНАРОДНАЯ КВАНТОВО-КОМПЬЮТЕРНАЯ ГОНКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ЧАСТЬ 1 (Обзор)

П. А. Правильщиков, канд. техн. наук  
ФГБУ "Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН", Москва, Россия

*Рассмотрено влияние квантовых компьютеров и квантовых алгоритмов на развитие информационных технологий в условиях квантовой революции в вычислительной технике и международной квантово-компьютерной гонки. Приводится обзор современного состояния разработок квантовых компьютеров, квантовых алгоритмов и языков квантового программирования. Подчеркивается, что создание аппаратуры квантовых компьютеров — это только первая половина пути к эффективным квантовым вычислениям и квантовому превосходству. Вторая половина пути связана с разработкой квантовых алгоритмов. Изложены причины появления новых вычислительных моделей. Анализируются опасения относительно вычислительных мощностей будущих квантовых компьютеров и квантовых ускорителей*

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

Современное состояние развития квантовых компьютеров (КК) и квантовых вычислений отразилось в международной квантово-компьютерной гонке за квантовым превосходством [1]. В лидерах оказалась Канада и США. Не отстают или мало отстают разработки КК в Азии (в КНР, Японии, Индии, Сингапуре, Иране). Страны Европы (Франция, ФРГ, Англия, Нидерланды, Италия, Испания, Дания) несколько отстают. Но их специалисты много делают для того, чтобы выйти в лидеры. В гонке участвуют также Австралия, ЮАР и страны Латинской Америки. И, конечно же, Россия.

Хотя экспериментальные прототипы КК появились ещё в 1990-х, международное квантово-компьютерное соперничество началось в 2007 г., когда канадская компания *D-wave systems* (далее *D-wave*) осуществила презентацию первого коммерчески доступного КК *Orion*. Аналогом оперативной памяти (ОП) классического компьютера в квантовом компьютере является его регистр. Объём регистра (то есть объём кванто-

вой информации, содержащейся в регистре) и количество кубитов\* в нём до сих пор определённым образом характеризуют возможности квантовых вычислений КК. Хорошая метрика с одним числом для КК должна указывать, насколько хорошо вся квантовая система решает вычислительные задачи. Конечно, это можно сделать достаточно приблизительно. Но пока идеальной метрики не найдено, поэтому квантовый компьютер до сих пор зачастую характеризуется числом кубитов в его регистре. Регистр КК *Orion* одержал всего лишь 16 кубитов. Это означало, что регистр КК *Orion* мог одновременно содержать  $2^{16}$  различных чисел. Такой объём по сравнению с объёмом 16 бит ОП (всего одно число в 16 разрядов) объясняется тем, что в отличие от бита классической ОП кубит

---

\* Термин «кубит» означает квантовый бит, то есть один разряд в регистре КК. Заметим, что сегодня известны более сложные характеристики производительности и качества КК, но в большинстве случаев КК характеризуются метрикой с одним числом кубитов.

может содержать не только 0 либо 1 по отдельности, но в состоянии суперпозиции одновременно и 0, и 1. В квантовой механике (КвМ) квантовая (когерентная) суперпозиция — это суперпозиция состояний квантового объекта (например, кубита), которые не могут быть реализованы одновременно с классической точки зрения, то есть это суперпозиция альтернативных (взаимоисключающих) состояний. В контексте КвМ закон существования суперпозиций состояний квантового объекта обычно называется принципом суперпозиции.

Появление и стремительное развитие КК приводит к слиянию знаний в области информационных технологий (ИТ), информатики и управления, кибернетики и физики. Математические выражения для кубитов заимствованы из КвМ и линейной алгебры. О слиянии физики, кибернетики и математики свидетельствует понятие «квантовых алгоритмов», которые часто являются квантовой модификацией алгоритмов, уже известных из классической теории. В результате этого слияния методы ИТ, информатики и теории управления стали широко применяться в физике, а методы квантовой физики всё больше применяются в ИТ, в информатике и управлении (в частности, в области квантовых вычислений). Всё больше меняется и понятийная сетка. Так, наряду с понятием «квантовый алгоритм» появились термины «квантовая информатика» (*quantum computer science*) и «квантовые информационные технологии». Квантовая информатика оказывает всё большее влияние на физику — технологии создания КК на разных физических платформах постоянно развиваются. По мнению некоторых отечественных физиков, разнообразие физических платформ в целях создания КК удивительно. Используются такие области исследования, как ядерный магнитный резонанс, физика конденсированного состояния, квантовая оптика, спектроскопия и другие самые разные направления в физике, чего в истории науки ещё не было. Люди, которые занимаются совершенно разными областями физики, решают сходные задачи, говорят на одном и том же языке и используют похожие метрики для оценки своего прогресса.

Появление коммерчески доступных КК, разработка квантовых алгоритмов, возникновение понятия «квантовая информация», реализация каналов квантовой связи неизбежно ведут к некоторым изменениям определения понятия ИТ. Пока стандартных определений, учитывающих понятие «квантовая информация», не существует. Опираясь на упомянутые в [1] стандарты ИТ, можно предложить следующее определение понятия информационной технологии: ИТ — это классические и квантовые ресурсы, необходимые для процессов сбора, обработки, хранения и распространения классической и квантовой информации.

Частным случаем понятия ИТ становится понятие «квантовые ИТ», когда речь идёт о процессах сбора, обработки, хранения и распространения только квантовой информации с использованием КК и каналов квантовой связи. Например, в России добились больших успехов в области передачи квантовой информации. В 2021 г. была запущена первая национальная квантовая сеть. Она объединяет ключевые объекты в Москве, Санкт-Петербурге и Нижнем Новгороде. Длина суперсети составляет 1147 км, и до конца 2023 г. она увеличится вдвое [2]. Планируется подключить Казань, Арзамас, Воронеж и Ростов-на-Дону. В ближайшем будущем к этой сети будут подключены и другие города, чтобы связать государственные, финансовые (прежде всего, банковские) и научные учреждения. Конечной целью является объединение всех крупных городов и центров обработки данных страны. Это важный шаг в обеспечении национальной безопасности, так как незаметно взломать квантовую сеть с позиций квантовой физики невозможно.

Необходимо подчеркнуть, что классические ИТ привели к безбумажным технологиям, к замене бумажных книг и, более того, к замене бумажных денег электронными. Возможно, в недалёком будущем появятся «квантовые книги» и «квантовые деньги», банкноты которых невозможно подделать. О них написана не одна статья [3, стр. 171]. Некоторые отечественные специалисты в области квантовых вычислений считают, что «уже в течение одного-двух десятилетий все компьютеры станут квантовыми» [4].

#### Квантовые компьютеры в Северной Америке

Дж. Роуз (*Geordie Rose*), один из разработчиков КК *Orion*, во время презентации 11 мая 2007 г. высказал прогноз о развитии КК, согласно которому через 10 лет должен был быть построен квантовый компьютер с регистром в один миллион кубитов. Но, хотя прошло уже 16 лет, прогноз Дж. Роуза не сбывся. Пока компания *D-Wave* разработала и использует коммерчески доступный КК *Advantage* с регистром в 5000 кубитов. Заметим, что после 2027 г. концерн *IBM* планирует создать КК с регистром, содержащим 100000 кубитов, а затем к 2030 г. и с регистром в миллион кубитов [5, 6]. О квантовых компьютерах компании *D-Wave* написано в [7].

Для снижения чувствительности к зарядовому шуму был разработан «трансмон», который в сверхпроводящих квантовых вычислениях представляет собой тип сверхпроводящего зарядового кубита. Поскольку технология производства трансмонов схожа с производством обычных чипов, многие игроки нарождающегося рынка, включая *Google*, *IBM* и *Rigetti*, оста-

новились на трансмонах. Однако трансмоны в качестве физической основы кубита далеко не идеальны. Им требуются чрезвычайно низкие температуры, малая вариабельность от устройства к устройству, и квантовое состояние они удерживают хорошо, но не идеально. Многие специалисты в этой области считают, что у иных технологий всё ещё есть шансы превзойти трансмоны. Квантовый процессор, используя квантовые алгоритмы, управляет вычислениями с помощью логических кубитов\*. Квантовые алгоритмы заканчивают вычисления, увеличивая вероятность того, что определенные круговороты тока появятся в специфическом состоянии, соответствующем либо состоянию  $1|0\rangle + 0|1\rangle$ , либо состоянию  $0|0\rangle + 1|1\rangle$ , когда произойдёт измерение — квантовое считывание результата вычислений. Увеличение вероятности означает увеличение той или иной амплитуды вероятности в суперпозиции кубита.

Приведем появление КК компании *D-wave* в ретроспективе:

Квантовые компьютеры компании *D-wave systems*

Наименование КККК	Число $n$ кубитов квантового регистра	Дата появления презентации
<i>ORION</i>	16	13.02.2007
<i>LEDA</i>	28	7.11.2008
<i>D-wave I (D-wave One)</i>	128	11.05.2011
<i>D-wave II (D-wave Two)</i>	512	2013 (май)
<i>D-wave2X</i>	1000+	2015
<i>D-Wave 2000Q</i>	2000	2017
<i>Advantage</i>	5000	2020

Из таблицы видно, каких больших успехов достигла канадская компания *D-wave*. Регистр квантового компьютера *Advantage* может хранить  $2^{5000}$  больших двоичных чисел [8]. Квантовые компьютеры компании *D-wave*, по суще-

ству, являются проблемно-ориентированными КК, использующими алгоритм квантового отжига. Этот алгоритм позволяет решать задачи оптимизации, имеющие важное практическое значение. Также КК компании *D-wave* наряду с квантовыми компьютерами компании *Google* используются при решении ряда задач искусственного интеллекта (ИИ). Некоторые физики считают, что КК компании *D-wave* не являются полноценными КК, так как не все их кубиты находятся в запутанном состоянии. Но, несмотря на это, один КК уже приобрела корпорация Локхид Мартин, входящая в военно-промышленный комплекс США. Было заявлено, что приобретение сделано для верификации программ и проектов аппаратуры компьютеров, к надёжности которых предъявляются повышенные требования [1]. В [1] упоминается, что такой же КК приобрела *Google* для исследований в области ИИ, а также *NASA*, ЦРУ и ФБР.

В [1] отмечено, что в концерне *IBM* создан прототип КК с регистром в 53 запутанных кубита, а также коммерчески доступный КК *Quantum System One* компании *IBM* с регистром в 27 запутанных кубитов. В 2021 г. *IBM* начала продвигать КК на рынки Германии, Японии и Южной Кореи. В ноябре 2021 г. *IBM* объявила об успешном создании квантового процессора *Eagle* на 127 кубитов. Годом позже компания выпустила процессор *Osprey* с регистром в 433 кубита [5, 6]. В 2023 г. *IBM* планирует к выпуску процессор *Condor* с регистром, содержащим 1121 кубит. А. Кришна, исполнительный директор *IBM*, в мае 2022 г. заявил, что к 2025 г. концерн выставит на продажу тысячи КК [9]. По словам главы компании, эти системы будут обладать вычислительной мощностью в 4000 кубитов, в то время как на май 2022 г. наиболее мощные системы поддерживают около 127 кубитов. На практике КК будут использоваться для оптимизации маршрутов беспилотных грузовых автомобилей, а также моделировать финансовые риски с беспрецедентной эффективностью. По словам Кришны, для решения таких задач потребовались бы традиционные компьютеры «размером с планету».

Регистр каждого КК *IBM* построен из трансмонов. Такие кубиты на физическом уровне представляют собой изготовленные из сверхпроводящего металла кольца малого диаметра, которые при работе при температуре милликельвинов (на ничтожную долю градуса выше абсолютного нуля) подчиняются тем же правилам, что и атомы. Данные в кубитах таких регистров представлены в виде электронных состояний таких колец. Состояния колец рассматриваются как квантовые состояния искусственных атомов. У них время когерентности  $\Delta t_{\text{ког}}=100$  мкс, скорость операций 10 нс и точность операций 99 %. Трансмоны имеют относительно высокую скорость операций и мас-

\* Здесь необходимо напомнить, что различают физические кубиты и логические кубиты. Физический кубит — это физическое устройство (например, трансмон в виде аллюминий-ниобиевого кольца), которое ведет себя как квантовая система с двумя состояниями. Это устройство используется в качестве компонента регистра КК. Логический кубит — это абстрактный кубит, который работает так, как указано в квантовом алгоритме. Он имеет достаточно долгое время когерентности, чтобы его состояния можно было бы преобразовывать квантовыми вентилями в процессе реализации алгоритма. Один логический кубит может быть построен из многих физических кубитов в целях надёжности квантовых вычислений. Многие физические кубиты, работают как один логический кубит, и это делается в целях борьбы с ошибками (квантовая коррекция ошибок, отказоустойчивость). Заметим также, что реализацию кубитов можно разделить на две категории: стационарные кубиты и бегущие кубиты (*flying qubits*), которые используются в квантовых каналах связи и в некоторых фотонных вычислителях.

штабируемость, но низкое время  $\Delta t_{\text{кор.}}$ . Вычислительные процессы иницируются при помощи последовательностей микроволновых импульсов. В силу физической специфики трансмонов процессор может функционировать только при температурах, близких к 0 °К, поэтому его приходится держать в мощном промышленном холодильнике, оказывающемся неотъемлемой частью КК.

В конце 2023 г. *IBM* представит первую рабочую систему *IBM quantum system two*, которая является строительным блоком квантово-ориентированных суперкомпьютеров\*. *IBM quantum system two* — это не просто автономная система. Она разработана с учетом возможности расширения и поддержания около 4158 кубитов с дополнительными стойками управления. Система *IBM quantum system two* спроектирована как модульный квантовый компьютер и таким образом, что несколько двойных систем могут соединяться с разветвителями дальнего действия. В случае такого соединения квантовых процессоров будет поддержано до 8316 кубитов. Возможно и такое соединение двойных систем, когда поддерживается до 16 632 кубитов [10]. По сути, концерн *IBM* превзошёл достижения *D-wave* [8].

Сегодня в концерне *IBM* провозглашают, что уже достигли «эры квантовой полезности» и готовы с помощью облачного сервиса *IBM Quantum Experience* привлечь к перспективным разработкам КК максимальное количество фирм и энтузиастов со всего мира [11–13]. Отчасти это связано и с тем, что при попытке создания библиотеки квантовых алгоритмов специалисты *IBM* осознали, что без квантовых алгоритмов аппаратура их КК становится никому не нужным дорогостоящим железом [14], так как квантовые алгоритмы, эффективно используя квантовый параллелизм, приводят к квантовому ускорению решения задач. Но инженеры-физики, разрабатывающие аппаратуру КК, часто недооценивают квантовые алгоритмы и алгоритмы вообще, так как своих собственных алгоритмов они, как правило, не имеют. Однако специалисты в области теории алгоритмов отстаивают положение о том, что алгоритмы следует рассматривать как такой же технологический продукт, как, например, аппаратура компьютеров, графические интерфейсы пользователя, объектно-ориентированные системы или сети [15, 16]. Поэтому руководство *IBM* стремится привлечь к разработке квантовых алгоритмов как можно больше специалистов из любых сфер деятельности. Здесь можно несколько разочаровать некоторых математиков, и особенно тех, кто создает классические алгоритмы для решения некоторых массовых задач (например, алгоритмы сортировки) [15]. Эти математики

полагают, что если их алгоритмы записать на одном из языков квантового программирования, то это позволит решать сложные задачи и достичь квантового ускорения, и, возможно, даже квантового превосходства. Однако сегодня это не так. Квантовое превосходство достигается за счёт эффективного использования механизма квантового параллелизма, а не за счёт высокой тактовой частоты КК, которая у квантовых компьютеров относительно невысока. Не случайно профессор МГУ Ю. И. Ожигов утверждает, что «с абстрактной точки зрения достижение квантового ускорения — это своеобразное произведение искусства, которое встречается нечасто» [16].

Говоря об успехах *IBM*, необходимо остановиться и на одной из важных проблем, с которой столкнулись разработчики в этой компании. Оказалось, что необходимо гораздо более энергоэффективное управление кубитами (трансмонами). Проблему озвучил вице-президент *IBM* по квантовым технологиям Дж. Гамбетта [17]. В настоящее время для работы каждого трансмона *IBM* требуется около 65 ватт. Гамбетта утверждает: «Если я хочу сделать КК с регистром в 100000 кубитов, то мне понадобится целое здание для монтажа, атомная электростанция для питания и миллиард долларов, чтобы сделать одну машину. Это просто невозможно, да никому и не нужно. Чтобы перейти от 5000 кубитов к 100000, нам явно нужны инновации» [17]. Гамбетта сообщил, что к разработке необходимых инноваций будут привлекаться университеты. Исследователи из Токио и Чикаго уже добились значительных успехов в области создания компонентов и коммуникационных инноваций. Они могут стать важными частями конечного продукта. Он считает, что в следующем десятилетии будет много совместных работ между промышленностью и академической наукой: «Мы должны помочь университетам делать то, что у них получается лучше всего» [17]. На это планируется потратить 100 млн. долл. США.

В гонке за квантовым превосходством компания *Intel* несколько задержалась на старте, так как специалистам в области интегральных технологий в силу инерции мышления трудно было сразу отказаться от привычного развития больших интегральных схем (БИС) по закону Мура. Но уже в 2017 г. *Intel* представила прототип КК *Tangle Lake* с регистром в 49 трансмонов ( $L=49$ ). После этого разработки в *Intel* вызвали особый интерес, так как инженеры компании показали, что регистр КК может быть построен на двух типах запутанных кубитов. Первый — трансмоны, которые делают и конкуренты *Intel*. Второй тип кубитов называют **спиновыми**. Как утверждают инженеры *Intel*, они похожи на обычные транзисторы. Таких транзисторов на серверных процессорах *Intel* миллиарды. Разработчики КК в *Intel* надеются, что смогут модифицировать эти транзисторы

\* Презентация состоится на саммите *IBM Quantum Summit* в конце 2023 г.



так, чтобы они работали как спиновые кубиты. Тогда кремниевая технология поможет создать мощнейший КК [18]. Идея использования кремниевых технологий в целях создания КК появилась ещё в 2006 г. [19]. Но, как ни странно, эту идею выразили не специалисты из *Intel*, а японские учёные, которые сотрудничали с *IBM*. Они утверждали, что при дальнейшем уменьшении технологических размеров кремниевых БИС до  $\approx 1$  нм и менее, в них будут возникать квантовые эффекты. Например, появится квантовый эффект туннелирования, что сделает функционирование таких БИС крайне ненадёжным. Появление квантовых эффектов в БИС служит непреодолимым препятствием для дальнейшего увеличения степени интеграции. Но, с другой стороны, как предположили японские учёные, эти квантовые эффекты можно будет использовать в целях разработки КК. В 2006 г. эта идея не нашла применения. Но сегодня кремний приближает квантовые вычисления [20].

В 2019 г. регистр КК компании *Intel* содержал только 3 спиновых кубита, но, несмотря на это, представители *Intel* уже заговорили о создании КК с 1 млн. кубитов. В *Intel* считают, что технология на основе спиновых кубитов на данном этапе уникальна, так как спиновые кубиты обладают двумя важными преимуществами. Одно из них заключается в размерах [21]. Их размеры ( $\approx 50 \times 50$  нм) в миллион раз меньше размеров трансмонов. Другое преимущество спиновых кубитов состоит в том, что они не так чувствительны к низкой температуре, как трансмоны, которые должны находиться при температуре, близкой к 0 °К, чтобы не искажалась квантовая информация. Сложные системы охлаждения не позволяют современным КК использовать больше нескольких тысяч кубитов, и до масштабирования в миллион кубитов еще далеко. В том числе и по причине сложного охлаждения (см. выше утверждения Дж. Гамбетты). Спиновые кубиты могут работать при температуре 1 °К, тогда как трансмоны должны охлаждаться до 20 мК, что в 50 раз холоднее и намного дороже [21]. Кроме того, охлаждать нужно только кубиты, а другие компоненты КК располагаются за контуром охлаждения, что неидеально. Спиновые кубиты позволяют перенести остальные компоненты ближе к кубитам, что снизит сложность. Тогда кремниевая технология и поможет создать мощнейший КК.

Направление исследований и разработок *Intel* в области квантовых вычислений проводится исключительно внутри компании на основе технологии, которая так и называется «спиновый кубит». Это важное нововведение, поскольку чипы спиновых кубитов производятся в *Intel* с использованием традиционных методов изготовления кремния. В июне 2018 г. *Intel* сообщила, что начала тестирование 27-спинового кубитного чипа, и потенциал этого подхода поистине захватывающий. Согласно

информации, размещенной на сайте *Intel*, компания нацелена на производство квантовых процессоров в течение десяти лет и ожидает, что технология начнет входить в свою коммерческую фазу примерно в 2025 г. [22]. В 2022 г. *Intel* представила прототип процессора с регистром в 144 спиновых кубита (используется кремниевая технология). Ранее был разработан и прошёл тестирование прототип КК с регистром в 27 кубитов. Компания также разрабатывает процессор с регистром в 1000 кубитов с использованием технологии трансмонов. Спиновые кубиты на базе одиночных электронов можно масштабировать до сотен тысяч и миллионов кубитов в одном процессоре, который не будет размером с дом или занимать этаж, и даже не будет занимать одну комнату. По этому пути идёт не только компания *Intel*, но и множество сотрудничающих с ней научных коллективов. Так, физики из Принстонского университета доказали, что оперирование спиновыми кубитами может достигать высочайшей точности, а именно 99,8 % [20]. Предыдущие работы показывали точность не выше 90 %, что сильно ограничивало квантовые вычисления и заставляло создавать сложные решения для компенсации погрешности.

Сегодня в *Intel* существует три подхода к созданию кремниевых спиновых кубитов – конфигурация *Loss-DiVencenzo*, конфигурация *Single-Triplet* и конфигурация *Exchange-Only* [21]. У каждого подхода есть свои сильные и слабые стороны с точки зрения изготовления, физики функционирования и масштабируемости. В связи с этим специалисты *Intel* изучают множество параметров, таких как размеры квантовых точек, геометрию, длину кубитов. *Intel* также встраивает в свой чип средства тестирования для определения производительности в тех случаях, когда используются разные типы спиновых кубитов. Отметим, что в рамках закона США о национальной квантовой инициативе *Intel* сотрудничает с лабораториями Исследовательского управления армии США. В 2022 г. *Intel* с нидерландским исследовательским центром *QuTech* добилась промышленного уровня производства квантовых процессоров на кремниевых кубитах [23]. Прорыв совершён на предприятии *Intel D1* в Хиллсборо, штат Орегон. Процессоры производятся с использованием классических КМОП техпроцессов на 300-мм кремниевых подложках с высочайшим уровнем выхода годных чипов — более 95 %.

В июне 2023 г. компания *Intel* объявила о выпуске 12-кубитного кремниевого чипа *Tunnel Falls* и его доступности для исследователей квантовых вычислений. Используя *Tunnel Falls*, учёные могут сразу же приступить к экспериментам и расчётам, вместо того чтобы пытаться изготовить свои собственные устройства. В результате возможен более широкий спектр исследований, включая изучение основ кубитов и разработку новых методов работы с устрой-

ствами с несколькими кубитами. Дж. Кларк (*James Clarke*), директор *Quantum Hardware* в *Intel*, заявил, что «процессор *Tunnel Falls* — это самый совершенный на сегодняшний день чип *Intel* с кремниевыми спиновыми кубитами. Он создан на основе многолетнего опыта компании в разработке и производстве транзисторов» [23]. Это следующий шаг в долгосрочной стратегии *Intel* по созданию полнофункциональной коммерческой системы квантовых вычислений. И хотя на пути к КК, устойчивому к ошибкам, необходимо решить ряд фундаментальных вопросов и задач, академическое сообщество в университетах теперь может изучать эту технологию в целях ускорения развития своих исследований. Благодаря использованию отработанной технологии КМОП производство *Tunnel Falls* обеспечивает выход годных чипов на уровне 95 % по всей пластине подложки, позволяя получать с каждой пластины более 24000 работающих квантовых чипов. Эти чипы способны образовывать конфигурации от 4 до 12 кубитов, которые можно изолировать или использовать в операциях одновременно, в зависимости от потребностей исследователей. Если точность измерений будет возрастать, то спиновые кубиты ( $v=2$ ) можно будет заменить на кутриты ( $v=3$ ), куквадриты ( $v=4$ ), а, возможно, и куниты (англ. эквивалент *qudit*) с большей величиной  $v$ .

В октябре 2021 г. американская компания *IonQ* сообщила о лучшем в своем классе КК *IonQ*, известном как *Forte*. В настоящее время *IonQ* разрабатывает в Сиэтле следующее поколение *Forte*. КК *Forte* имеет всего 32 кубита, но специалисты компании *IonQ* в марте 2022 г. утверждали, что это самый мощный КК из всех существующих в данное время [24–26]. Ионные кубиты значительно превосходят сверхпроводящие кубиты (трансмоны), поскольку уровень достоверности операций на сложных задачах с ионными кубитами выше и позволяет провести в 100 раз больше операций без потери когерентности [27]. Это послужило основанием специалистам компании *IonQ* на основе собственной метрики считать КК *Forte* на тот момент самым мощным. КК *Forte* содержит 32 кубита. На момент сообщения о готовности КК *Forte* это было меньше, чем у *Google* и *IBM*. Однако достоверность вычислений системы *IonQ* составляет 99,9 %, то есть ионные кубиты достигли самого низкого уровня ошибок квантовых вентилях среди всех технологий изготовления КК. Квантовый компьютер *Forte* может выполнять операции с более чем 550 квантовыми вентилями, что существенно больше по сравнению с трансмонами, которые могут выполнять операции только с несколькими десятками квантовых вентилях. Ионные кубиты в ловушке достигли самого длительного времени когерентности среди всех технологий изготовления КК. Это позволяет компании *IonQ* пре-

взойти своих конкурентов. КК *Forte* изготовлен в виде нескольких прототипов и показывал в 2022 г. наибольшую в мире квантовых компьютеров производительность. Конфигурация кубитов и вентилях в КК *Forte*, по утверждению *IonQ*, может быть программно адаптирована к потребностям пользователя, создавая по-настоящему динамичную и гибкую систему. Любой кубит в системе может быть непосредственно связан (запутан) с любым другим кубитом. И благодаря этому, квантовый компьютер *IonQ* можно считать самым мощным из всех созданных к началу 2022 г. КК [27]. Компания *IonQ* заявила также, что в скором времени новый КК станет доступным для приобретения.

В наши дни с появлением квантовых компьютеров происходит революция и в области ИИ, где появляются квантовые нейросети на платформе КК. И хотя современные системы ИИ уже являются достаточно развитыми, КК обладают потенциалом вывести их на новый уровень. Здесь уместно сделать отступление, касающееся развития систем ИИ. Сегодня различают три вида ИИ: узконаправленный ИИ (УИИ), общий (универсальный) ОИИ, искусственный суперинтеллект (ИСИ)\*.

Примерами УИИ являются программы-переводчики с одного языка на другой, различные телефонные боты, отвечающие на вопросы, программы шахматной игры, программы распознавания лиц, системы управления беспилотными автомобилями и боевыми дронами. ОИИ пока не создан, но, как предполагается, он не должен уступать интеллекту человека по универсальности применения. ИСИ должен превзойти человеческий разум не только по своей универсальности, но и по решению таких сложных задач, решение которых недоступно человеку [28–30]. В качестве примера сложных задач можно привести проблему ( $P = ? NP$ ), которая является первой в списке задач третьего тысячелетия и пока не решена. Последние достижения в области разработки УИИ, полученные в этом десятилетии (и, в том числе, полученные в ИПУ РАН), безусловно, можно считать прорывом в этой области. Эти успехи означают, что технологическая сингулярность, наступление которой после 2035 г. в [31] предсказал футуролог и математик В. Виндж, достигнет нас значительно раньше\*\*. Но когда? Что, если ИИ на платформе классических компьютеров – это не вершина? В [32] автор задаёт вопрос: «Что, если нас ждет еще больший прорыв, когда мы перейдем от полупроводниковых

\* Иногда употребляют термин сильный искусственный интеллект, который также обозначают ИСИ.

\*\* В. Виндж: «Мы на грани великих перемен. Всё то, на что, как считалось, нужны "тысячи веков", случится в ближайшие сто лет. И, несмотря на весь свой оптимизм, мне было бы комфортнее, если бы от этих сверхъестественных событий нас отделяли тысячи лет, а не двадцать» [31].

компьютеров к машинам, которые используют квантовые свойства атомов и фотонов? Настоящая научно-техническая революция в создании умных машин произойдет не столько в области ИИ, но в связке методов машинного обучения и квантовых компьютеров». Недавно считалось, что попытки слияния КК с машинным обучением нейросетей равносильны попыткам «смешивания масла с водой» [32].

Как показано выше, КК после десятилетий исследований готовы выполнять вычисления с опережением любых других компьютеров на земном шаре. Как показали исследователи компаний *Google* и *D-wave*, сегодняшние ещё «шумящие» КК прекрасно подходят для нужд машинного обучения. Они манипулируют огромными объёмами данных за один проход, выискивают неуловимые закономерности, невидимые для классических компьютеров, и не останавливаются в ситуации, когда сталкиваются с неполными или неопределёнными данными. Компании *Google*, *Microsoft*, *IBM* и другие техногиганты вливают средства в квантовое машинное обучение и в инкубатор стартапов, посвящённый этой теме, расположенный в Торонтском университете. «Машинное обучение» становится модным словечком», — говорит Дж.Биамонт, специалист по квантовой физике из Сколково. «А смешав его с понятием «квантовый», вы поучите мегамодное слово» [32, 33]. В связи с этим сообщается, что *IonQ* заключила договор о партнерстве с известным Центром компетенций в области квантового ИИ в Базеле (Швейцария) [24]. Этот Центр известен как *QuantumBasel*, и это первый в Швейцарии центр квантовых вычислений. После этого *IonQ* стали называть бесшумным гигантом в области ИИ следующего поколения [24]. Ранее квантовые процессоры с оптическими ионными ловушками выпускались с использованием кремниевых подложек. Компания *IonQ* также использовала эту технологию, но новые многоядерные процессоры компания начала выпускать на подложках из кварцевого стекла [25]. Одной из причин перехода на новые материалы в компании называют упрощенную обработку стекла по сравнению с кремнием. Также микросхемы из стекла не создают случайные электромагнитные поля и не препятствуют проникновению лучей лазеров в широком оптическом диапазоне, что повышает эффективность работы каждого процессора и упрощает сопряжение нескольких квантовых процессоров в один вычислительный узел. Падающие на чип лазерные лучи могут управлять только 16 кубитами одновременно, то есть одной цепочкой. Если связывать цепочки последовательно в процессоре, то можно получить один узел. Такой принцип работы гораздо проще системы трансмонов, который используют *IBM* и *Google*. И важно то, что резкий рост производительности происходит уже на этапе добавления каждого нового кубита в цепочку.

При этом *IonQ* не использует никакой криогеники, вплоть до стоечной компоновки в обычных вычислительных залах. Такая технология широко используется для производства микржидкостных микросхем для задач аналитической химии и медицины, поэтому с заводскими мощностями у компании *IonQ* проблем нет. Это работает и стоит совсем недорого. Кроме эффективности производства переход на стекло оказывает дополнительные и более важные эффекты — отсутствие случайных электромагнитных полей, которые возможны в кремнии, а также прозрачность для лазеров в широком оптическом диапазоне. Первый даёт низкий уровень помех и повышает точность вычислений с кубитами, а второй позволяет с наименьшими потерями проникнуть лучам лазеров внутрь чипа и достучаться до удерживаемых в ловушке ионов (кубитов), чтобы выполнить необходимые операции. Какие квантовые алгоритмы будут использованы и какие задачи, кроме обучения квантовых нейросетей, будет решать данный КК, пока не сообщается. Но можно предположить, что квантовые компьютеры *IonQ* в скором времени перейдут на использование кунитов, что увеличит мощность КК, однако, пока неизвестно, с каким числом  $V$ .

В США разработкой КК занимаются в компаниях *Google*, *Microsoft*, *Rigetti* и *Honeywell*. Компания *Google* строит КК с регистром из трансмонов, как и *IBM*. Недавно (в апреле 2023 г.) появилось сообщение, что в корпорации *Google* создали сверхмощный КК, способный за 6,7 секунды производить вычисления, на которые у официально признанного самым производительным в *TOP500* компьютера *Frontier* ушло бы 47 лет [34]. Об этом говорится в статье исследователей *Google*. Работа была опубликована в апреле 2023 г., но ещё не прошла рецензирование. Тем не менее, многие издания написали о создании *Google* сверхмощного КК, как о признанном факте. Необходимо обратить внимание на то, что в 2019 г. *Google* уже заявляла, что добилась квантового превосходства. Тогда речь шла о создании КК с регистром в 53 кубита, который мог за 200 секунд выполнить вычисления, на которые у суперкомпьютера *Summit* (*IBM*) ушло бы 10 тыс. лет. Но это заявление оспаривалось конкурентами из *IBM*, которые утверждали, что *Google* преувеличивает разницу между своим КК и традиционными суперкомпьютерами.

В 2023 г. написана статья «Фазовый переход в выборке случайных цепей», под которой подписались более полутора сотен сотрудников *Google* [34]. В ней утверждается, что новейшая технология корпорации «выходит за рамки возможностей существующих классических суперкомпьютеров». У нового КК следующего поколения компании *Google* регистр содержит 70 кубитов. А так как добавление большего количества кубитов увеличивает производительность КК в геометрической прогрессии, это значит,

что новая разработка компании в 241 миллион раз производительнее, чем её устройство 2019 г. К тому же сотрудники *Google* утверждают: «Мы пришли к выводу, что наша демонстрация строго соответствует режиму неклассических квантовых вычислений» [34]. В ещё одной публикации, посвящённой последнему достижению *Google*, журналист из *Science Alert* напоминает, что «хотя мы и называем эти устройства КК, они больше похожи на прототипы: в настоящее время они требуют сверхспецифических, экстремальных условий для работы и изо всех сил стараются оставаться стабильными и безошибочными» [34, 35].

В компании *Microsoft* с самого начала исследований и разработок квантовых компьютеров решили уделить особое внимание как раз стабильности и безошибочности функционирования КК. Малые погрешности квантовых вентилях, реализующих унитарные операции, могут аккумулироваться, приводя, в конце концов, к серьёзным сбоям в вычислениях. Любая эффективная стратегия борьбы с ошибками в КК должна обеспечивать защиту как от декогерентизации, так и от малых унитарных ошибок в квантовых схемах. Для этого в качестве физической основы кубита специалистами *Microsoft* были выбраны майорановские фермионы\*. Интерес к таким квазичастицам\*\* связан с тем, что они теоретически могут использоваться в кубитах для топологического КК [35]. Так, их можно использовать для сохранения квантовой информации. При этом из-за своей нелокальной природы они менее чувствительны к влиянию среды, то есть к шумам. Используя майорановские фермионы можно достичь отказоустойчивости в работе квантовых компьютеров путём разработки «железа» КК с внутренней сопротивляемостью декогерентизации и другим ошибкам, заметно снижая увеличение числа ошибок при стремительном росте размеров и глубины квантовых схем [36]. В 2023 г. группа исследователей *Microsoft Quantum* сообщила, что, преодолев технические сложности, сделала важный шаг на пути к созданию надежного и практичного КК [36, 37]. Ученые разработали

новый способ представления кубитов в устройстве, которое способно индуцировать майорановские нулевые моды — коллективное движение квазичастиц твердого тела, которое может быть описано как фермион, являющийся своей собственной античастицей. Майорановские фермионы подчиняются неабелевой статистике, то есть изменяют свое квантовое состояние, когда меняются местами. Такое преобразование системы, называемое плетением, может быть использовано для создания мощных КК, которые в *Microsoft* называют квантовыми суперкомпьютерами, поскольку эти квазичастицы, окружающие друг друга, способны кодировать квантовую информацию более надежным способом, чем другие виды физических кубитов.

Представители *Microsoft* также заявили, что создали новую меру для измерения производительности КК [36]. Она представляет собой число надежных квантовых операций в секунду (*rQOPS*), которое описывает, сколько надежных операций КК может выполнить за одну секунду. В *Microsoft* предполагают, что для того чтобы машина квалифицировалась как квантовый суперкомпьютер, ее *rQOPS* должен быть не менее одного миллиона. Они отмечают, что устройства, индуцирующие майорановские нулевые моды (квазичастицы), могут достигать миллиарда *rQOPS*, что делает их действительно полезными.

В июне 2023 г. *Microsoft* объявила о планах по созданию собственного квантового суперкомпьютера [37]. В опубликованной дорожной карте компания заявляет, что их квантовые суперкомпьютеры способны устранить нехватку продовольствия и обратить вспять изменение климата путем революционизирования химии. Еще предстоит достичь нескольких этапов, включая переход от «зашумленных физических кубитов» (от эпохи *NISQ*\*\*\* к надежным логическим кубитам. Но однажды созданный квантовый суперкомпьютер сможет «решить самые сложные проблемы, стоящие перед нашим обществом» [37].

Ранее корпорация *Honeywell* была известна разработками своих классических компьютеров и когда-то продавала массивные мэйнфреймы. На заре развития вычислительной техники *Honeywell* была заметным игроком. Еще в 1960-х гг. это была одна из нескольких компаний (*Burroughs, Univac, NCR, Control Data Corporation* и *Honeywell*), которая бросила вызов *IBM* на рынке мэйнфреймов. *IBM* в значительной степени выиграла эту битву, и *Honeywell* вышла из бизнеса [38]. Сегодня корпорация *Honeywell* производит электронные системы управления и автоматизации. Основные направления — аэрокосмическое оборудование,

\*Напомним, что в физике элементарных частиц майорановский фермион, или фермион Майораны — это фермион, который является своей собственной античастицей. Существование таких частиц было впервые рассмотрено итальянским физиком Э. Майораной в 1937 г. В экспериментах с полупроводниковыми нанопроволоками наблюдались квазичастицы, обладающие свойствами майорановского фермиона. В физике высоких энергий вопрос о существовании или несуществовании майорановских фермионов остаётся открытым. Однако никаких сомнений в их существовании в физике твёрдого тела (в частности, в некоторых полупроводниках и сверхпроводниках) аналогичных элементарных возбуждений (квазичастиц), предсказанных теоретически, нет. Вопрос заключается в демонстрации каких-либо связанных с ними наблюдаемых эффектов из-за технических сложностей.

\*\* Заметим, что дырки в полупроводниках физики иногда также называют квазичастицами.

\*\*\* *NISQ* — *Noisy Intermediate State Quantum*. Дж. Прескилл называет современные КК очень «грубыми», создающими значительные «шумы» (помехи), которые вызывают ошибки.

военные технологии, технологии нефти и газа, управления зданиями, технологии для эксплуатации зданий и промышленных сооружений, технологии химии и материаловедения, турбокомпрессоры. Но теперь в эпоху квантовой революции корпорация *Honeywell*, известная из далекого прошлого вычислительной техники, захотела перемен [39, 40]. Представители корпорации рассказали непротиворечивую историю её выхода на рынок. В рамках своей производственной работы *Honeywell* разработала составляющие КК на ионных ловушках – такие как фотоника, криогеника, вакуумные системы – для других целей. И группа учёных *Honeywell* заявила, что потенциал данной области достаточно большой, и его стоило попробовать развить. А поскольку *Honeywell* – это большая корпорация, она смогла набрать достаточно сильную группу людей, увлечённых разработкой этого проекта. Так, только за последние пять лет корпорации удалось собрать команду из более 100 специалистов, которые полностью сосредоточились на создании КК.

В 2020 г. представители *Honeywell* представили свой новый и, как утверждали в корпорации, самый мощный КК в истории [39–41]. После этого специалисты корпорации провозгласили лозунг: повышать производительность своих КК в 10 раз ежегодно в течение каждого из следующих пяти лет. Это означает, что в 2025 г. они будут в 100000 раз производительнее [38]. Учёные в *Honeywell* начали работать над созданием КК примерно в 2010 г., когда компания запустила производство криогенной техники и лазеров. В 2020 г., когда представители корпорации *Honeywell* презентовали новый КК, они утверждали, что их КК вдвое мощнее, чем известные в 2020 г. аналоги от *Google* и *IBM*. Эти утверждения были основаны на метрике (бенч-марк) *IBM* с использованием так называемого квантового объёма  $V_Q$ . У квантового компьютера компании *Honeywell* за счёт специальной конструкции он был равен 64, что было больше  $V_Q$  у тогдашних КК.

В условиях жёсткой конкуренции *Honeywell* указывает на недостатки квантовых компьютеров компаний *IBM*, *Google* и *Rigetti*, остановивших свой выбор на кубитах-трансмонах при разработках регистров КК. Кубиты-трансмона работают при циркуляции тока в петле сверхпроводящего провода, подсоединённого к резонатору, позволяющему контролировать и считывать состояние тока. Однако поскольку сверхпроводящий провод и резонатор необходимо изготавливать на производстве, это может привести к появлению небольших отличий между отдельными кубитами. Это приводит к увеличению шумов (к увеличению числа ошибок и сбоев в работе КК). Кроме этого, всё это «железо» нужно держать при чрезвычайно низкой температуре, лишь немногим превышающей абсолютный ноль (0 °K), чтобы удерживать

эти относительно крупные объекты в пределах их основного квантового состояния.

По заявлениям представителей *Honeywell* основу самого мощного КК в истории составляет стальная камера размером с баскетбольный мяч [38–42]. С помощью жидкого гелия она охлаждается до температуры  $-262,7^{\circ}\text{C}$ , при которой атомы (ионы)\* перестают двигаться. Для проведения квантовых вычислений холодными атомами (ионами), находящимися внутри стальной камеры, управляют с помощью лазерных импульсов и при помощи 200 электродов. Поскольку ионы заряжены, в рамках устройства их можно двигать, просто изменяя локальные электрические поля при помощи электродов, встроенных в устройство. По сути, кубит плюс лазер – это аналог транзистора в классическом понимании. В качестве кубитов используются ионы иттербия-171 ( $^{171}\text{Yb}^{+}$ ). Ионы иттербия подвешены в вакуумной камере, и вычисления выполняются путем манипулирования этими атомами с помощью лазеров и электродов.

Пойманные ионы дают возможность обойти некоторые из проблем, связанных с трансмонами. Атомы (ионы), как и электроны, считаются в квантовой физике идентичными друг другу. Сам кубит в КК компании *Honeywell* формируется из двух атомов. Т. Аттли, президент квантовых решений *Honeywell*, подчёркивает, что этот факт устраняет проблемы с производством, поскольку у каждого устройства получаются одинаковые свойства кубита, определяемые используемым атомом (в данном случае это иттербий). Аттли утверждает, что «каждый кубит начинается с идеала. Любая вносимая ошибка происходит из окружающей инфраструктуры» [41]. Благодаря опыту *Honeywell* в изготовлении и интеграции этой инфраструктуры, инженеры компании считают, что находятся в идеальном положении для минимизации шума, приводящего к ошибкам. Кроме того, небольшие скопления ионов можно охлаждать при помощи лазеров. И хотя температуру окружающей среды необходимо сохранять очень низкой, ей не обязательно достигать экстремальных температур, необходимых для корректной работы трансмона (см. выше). Однако атомы иттербия оказались не так-то легко охлаждать лазерами, поэтому инженеры добавили к системе парочку атомов бария и охладили лазером уже их. Скопление из четырёх ионов легко охлаждать и контролировать (то есть управлять ими), а окружение достаточно держать при температуре в 12 °K. Хотя для этого и требуется жидкий гелий, зато не нужно сложное сжижающее охлаждающее оборудование, которое требуется для «железа» от *Google* и *IBM*.

\* Ион – это атом, который имеет электрический заряд. Ионом также называется соединение нескольких атомов, обладающих зарядом.



Состоянием электронов в ионах можно управлять при помощи лазеров с определённой длиной волны, способных помещать электроны в суперпозицию с потенциальными энергетическими состояниями. Запутанность и различные логические операции можно проводить, передвинув два иона поближе друг к другу и используя лазеры, работающие с ними двумя одновременно. Считывание производится стимуляцией ионов ещё одним лазером, заставляющим ионы испускать фотон, по которому можно судить об их состоянии  $(1 \cdot |0\rangle + 0 \cdot |1\rangle)$  ли-

бо  $1 \cdot |0\rangle + 0 \cdot |1\rangle$ ). Устройство от *Honeywell* можно представить линейкой отдельных устройств. С одного конца заходят ионы, которые затем перемещаются по сменяющим друг друга участкам, где их можно задерживать для хранения или облучать лазерами, манипулирующими кубитами. Логические операции (в простейшем случае квантовый эквивалент операций *AND* и *NOT*) можно проводить, просто располагая два иона рядом, и выполняя операцию на них одновременно. Специалисты в *Honeywell* убеждены, что устройство можно быстро масштабировать, и что дополнительные кубиты можно будет добавлять ежегодно, не меняя архитектуру на фундаментальном уровне. Так что, хотя 6 кубитов – это мало по сравнению с тем, что получено на устройствах с транзисторами, но в корпорации считают, что смогут довольно быстро преодолеть этот разрыв. Число эффективных кубитов в КК *Honeywell* равно 6 ( $L=6$ ). Но это «честные» кубиты, как заявляют в корпорации, так как в квантовом компьютере одновременно связаны (запутаны) все 6 кубитов, тогда как, к примеру, в КК «*Q System One*» от *IBM* одновременно запутанными могут быть только некоторые из 20 кубитов. При использовании метрики *IBM* для нового КК компании *Honeywell*  $V_q=2^6=64$ , что в 2020 г. было больше, чем у КК *Google* и *IBM*. Это и сделало квантовый компьютер *Honeywell* в 2020 г. самым мощным КК в мире квантовых вычислителей [39]. Фактически, шестикубитовый КК от *Honeywell* оказался в четыре раза производительнее 20-кубитовой системы *IBM Q System One*. Возможно, это показывает, что идеальной метрики для оценки производительности КК не существует.

По словам специалистов корпорации *Honeywell*, подход с использованием ионных ловушек и холодных атомов делает кубиты системы более долговечными, чем в системах, разработанных в *IBM* и *Google* [43]. Это означает, что они могут выполнять вычисления с меньшим временем простоя, что повышает общую скорость обработки. Кубиты также могут взаимодействовать таким образом, чтобы ускорить квантовые алгоритмы. В целях создания крупнейшего в мире специализированного предприятия по разработке и выпуску квантовых вычислительных систем, квантовых алго-

ритмов и сопутствующего программного обеспечения (ПО), *Honeywell* в начале июня 2021 г. объединилась со стартапом *Cambridge Quantum Computing (CQC)* по разработке ПО для квантового компьютера [43].

Представители *Honeywell* считают, что по мере дальнейшего ускорения прогресса в области КК в течение следующих полутора-двух лет воспроизводить результаты квантовых вычислений, моделируя их на классических вычислительных платформах, станет практически невозможно [44]. Чуть позже *Honeywell* предоставила доступ к своему новому КК компаниям, которым нужно производить огромные объёмы вычислений. В 2020 г. корпорация *Honeywell* договорилась с *Microsoft*, что реализует доступ к своему КК с использованием облачного сервиса *Microsoft Azure* [41]. По словам Т.Аттли, стоимость этой услуги (то есть доступа к КК *Honeywell*) составила примерно 10000 долл. США в час [39]. Общее количество клиентов *Honeywell* неизвестно, но среди них есть, например, финансовый холдинг *JPMorgan Chase*. Известно, что у *JPMorgan Chase* есть собственные эксперты по квантовым вычислениям, которые будут использовать КК от *Honeywell* для выполнения сложнейших задач. В число таких задач, в частности, войдет построение моделей, облегчающих выявление мошеннических схем. Если у клиентов *Honeywell* не будет своих собственных экспертов по квантовым вычислениям, они смогут воспользоваться услугами компаний-посредников, например *Zapata Computing* и *CQC*. 19 июня 2020 г. *Honeywell* представила КК *System H1*, который имеет уже 10 кубитов. По сообщению корпорации, этот КК обеспечивает удвоенную производительность за счет объема  $V_q$  ( $V_q=128$ ) [40].

Компания *Rigetti* разрабатывает КК, используя, также как *IBM* и *Google*, в качестве кубитов транзисторы. В конце 2021 г. *Rigetti* объявила о ряде новых интересных разработок. Во-первых, разработан квантовый процессор *Aspen-11* в виде чипа, регистр которого содержит 40 кубитов [45]. Да, это намного меньше, чем у 127-кубитного чипа *IBM*, но конкурентоспособность мало пострадала: у частных специалистов по тестам есть доступ к 80-кубитной версии, полученной посредством квантового соединения двух процессоров. Если компания *Rigetti* действительно решила проблему квантового соединения процессоров, то одно из важнейших технических препятствий на пути развития КК можно считать устранённым. А если это решение может быть масштабировано на большее число процессоров-чипов, то перед нами открывается путь к быстрому увеличению числа кубитов. Другими словами, если специалистам *Rigetti* удастся организовать квантовую связь с большим числом квантовых процессоров, то можно будет выпускать многопроцессорные квантовые суперкомпьютеры. Для обычных

(классических) процессоров развитие обычно заключается в росте тактовой частоты и увеличении количества ядер или процессоров, а также в снижении энергопотребления. Для КК одним из наиболее важных показателей является частота ошибок, поскольку кубиты-трансоны, в отличие от обычных битов, могут терять информацию о своем состоянии. Инженеры *Rigetti* утверждают, что у процессора *Aspen-11* ошибки считывания кубита стали возникать вдвое реже. Отметим, что аналогом тактовой частоты у КК служит скорость передачи сигналов, принуждающих кубиты к выполнению логических операций. У процессора *Aspen-11*, по данным компании, скорость работы выросла в 2,5 раза. Этот показатель очень важен из-за вышеупомянутой склонности трансонов к потере состояния с течением времени. Чем больше операций удастся втиснуть в заданный промежуток времени, тем больше вероятность успеть выполнить вычисления до того, как возникнет ошибка.

Отдельно компания *Rigetti* заявляет, что сейчас она экспериментирует с предоставлением для независимых специалистов по тестам доступа к третьему энергетическому состоянию кубитов, преобразовывающему их в кутриты. Если кутриты будут вести себя стабильно, с их помощью можно будет обрабатывать значительно больше данных, используя то же оборудование [45]. Ранее в Австралии уже был создан прототип фотонного КК, регистр которого был построен из кутритов [46, 47]. Но о производстве таких фотонных КК пока неизвестно. Однако известно (как утверждается в [46]), что при решении одних и тех же задач использование кутритов в регистре КК позволило уменьшить объём квантового «железа» более чем в 5 раз по сравнению с объёмом квантового «железа» КК, у которого регистр построен на кубитах. В своём блоге компания *Rigetti* сообщает, что предоставляет экспериментальный доступ к новой конфигурации оборудования [45]. Все КК, доступные в настоящее время, построены на кубитах. Они могут принимать значения, включающие два состояния и их суперпозицию. Очевидно, что система с тремя состояниями обеспечивает большую мощность. Почему никто до сих пор это не реализовал для трансонов? Для трансонов — аппаратуры, используемой *Rigetti*, *IBM* и *Google* — проблема заключается в том, что энергетические уровни состояний, доступных после первых двух, разделены постоянно уменьшающимся количеством энергии. Так, разница между 1 и 2 гораздо меньше, чем разница между 1 и 0, а после 2 ситуация становится ещё печальнее. Для трансонов, и без того чувствительного к зарядовому шуму, трудно обеспечить уровень контроля, необходимый для работы более высоких уровней. Но *Rigetti* смогла-таки обеспечить программируемый доступ к одному из высокоэнергетических состояний, модифицировав своё ПО. Насколько это новшество окажется полезным в

реальности? Для ответа на этот вопрос придётся подождать окончания испытаний. Однако, даже если кутриты на базе трансонов в настоящее время вдруг окажутся малополезными, они, вероятно, смогут вновь вернуться на сцену по мере совершенствования аппаратуры и алгоритмов.

В [1] отмечалось, что особое внимание привлёк к себе прототип КК, разработанный в 2020 г. группой ученых из *Perdue University* (США) [48]. Каждый разряд в регистре этого КК является кунитом. Для каждого из кунитов  $v=32$ , где  $v$  — количество различных чисел, которые могут одновременно содержаться в одном куните, то есть в одном разряде регистра КК.

Если число кунитов в регистре равно  $L$ , то ёмкость  $V_{\text{КР}}$  равна  $32^L = 2^{5L}$ . Выпишем суперпозицию для данного кунита ( $v = 32$ ) в сокращённой форме:

$$|\psi_v\rangle = |\psi\rangle_v = \sum_{\xi=1}^{v=32} a_{\xi} |\xi-1\rangle \left| \sum_{\xi=1}^{v=32} |a_{\xi}|^2 = 1. \quad (1)$$

Теперь выпишем более наглядную форму записи суперпозиции кунита в начальном состоянии после инициализации регистра КК. Для данного кунита  $v=32$ .

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_v = & 1 \cdot |0\rangle + 0 \cdot |1\rangle + 0 \cdot |2\rangle + 0 \cdot |3\rangle + 0 \cdot |4\rangle + \\ & + 0 \cdot |6\rangle + 0 \cdot |7\rangle + 0 \cdot |8\rangle + 0 \cdot |9\rangle + 0 \cdot |10\rangle + 0 \cdot |11\rangle + \\ & + 0 \cdot |12\rangle + 0 \cdot |13\rangle + 0 \cdot |14\rangle + 0 \cdot |15\rangle + 0 \cdot |16\rangle + \\ & + 0 \cdot |17\rangle + 0 \cdot |18\rangle + 0 \cdot |19\rangle + 0 \cdot |20\rangle + 0 \cdot |21\rangle + \\ & + 0 \cdot |22\rangle + 0 \cdot |23\rangle + 0 \cdot |24\rangle + 0 \cdot |25\rangle + 0 \cdot |26\rangle + \\ & + 0 \cdot |27\rangle + 0 \cdot |28\rangle + 0 \cdot |29\rangle + 0 \cdot |30\rangle + 0 \cdot |31\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Условие нормировки:

$$\sum_{\xi=1}^{v=32} |a_{\xi}|^2 = 1. \quad (3)$$

Этот результат, полученный в *Perdue University* — начало нового направления в развитии КК, связанного не с увеличением числа  $L$  кубитов в регистре, а с увеличением числа  $v$  в каждом куните регистра. Увеличение числа  $L$  кунитов в регистре также приветствуется. Если компания *Rigetti* пытается создать регистр КК из кутритов на основе трансонов, то специалисты из *Perdue University* уже создали прототип, правда, фотонного КК, у которого регистр построен из кунитов с  $v=32$ . Если этот прототип привлечёт инвестиции для изготовления промышленной партии КК, то это будет большим успехом квантового компьютеростроения и победой в международной квантово-компьютерной гонке на данном историческом этапе развития квантовых технологий.

Как ранее было отмечено в [1], несмотря на громкие заявления, все приведённые КК не являются универсальными, так как существует теорема о запрете на создание универсального программируемого КК [3, стр. 137]. Универсальность КК связана с количеством и разнообразием квантовых вентилей. Если количество разнообразных квантовых вентилей неограниченно велико, то такой КК будет универсальным. Отсюда можно сделать вывод, что все приведённые выше КК являются программируемыми, но не универсальными. В последнее время появился и такой термин, как «общеупотребительные КК». Возможно, этот термин заменит употребление термина «универсальный КК». Но скорее всего, многие из приведённых выше КК являются проблемно-ориентированными.

Не так давно в 2021 г. из тени вышла компания *QuEra Computing* (в переводе «Эра квантовых вычислений») — стартап, созданный физиками из Гарвардского университета и Массачусетского технологического института. Основателями стартапа стали ведущие учёные в области квантовой физики, что даёт надежду на значительный прорыв в области квантовых вычислений [49]. Молодая компания обещает за пару лет создать КК с сотнями и даже тысячами кубитов, но начала она с рассказа об имитации 256-кубитовой системы. Как сообщается в [49], эта разработка представлена в июле 2021 г. Платформа с 256 кубитами была создана в гарвардской лаборатории под руководством российского и американского профессора Михаила Лукина, и значительный прогресс в разработке установки принадлежит ему и его гарвардской команде. Сам Лукин неоднократно повторял, что КК нельзя считать в полной мере программируемым и универсальным квантовым компьютером. Такие КК могут обеспечить моделирование физических процессов на квантовом уровне, но в ограниченном спектре приложений. Тем не менее, Лукин вошёл в число основателей компании *QuEra Computing*, которая задалась целью создания КК из сотен, тысяч и сотен тысяч кубитов.

Решение *QuEra Computing* опирается не просто на холодные атомы, а на сверхохлаждённые атомы рубидия, помещённые в дефекты кристаллической решётки. Сначала атомы «зависают» в дефектах случайным образом, но с помощью так называемого оптического (лазерного) пинцета атомы рубидия можно расставлять лазерными импульсами в нужном порядке, что чем-то напоминает программирование. Затем запускается процесс вычисления и система, в зависимости от начальных условий и последовательности точечных воздействий лазерами на отдельные атомы (по сути, это исполнение квантового алгоритма), приходит в определённое состояние, то есть выдаёт результат вычисления после измерения (квантового считывания).

Некоторые из таких процессов невозможно рассчитать на классических компьютерах за приемлемое время  $\Delta t_{пр}$ , но моделирование на кубитах даёт результат быстро и с относительно небольшой вероятностью ошибки. К примеру, 256 кубитов дают комбинацию, которая превышает число атомов в солнечной системе. Представьте, если таких кубитов будет тысяча или сотни тысяч. Определённо, получится нечто интересное и ранее даже непредставимое, хотя учёные тоже не особенно понимают, что это будет и для решения каких задач это пригодится [49], но за компанией *QuEra Computing* стоят лучшие в мире специалисты в этой области.

В [50] утверждается, что, используя свои КК, специалисты *QuEra Computing* совместно с учёными Университета Инсбрука достигли квантового превосходства при решении задач на оптимизацию. Авторы работы отмечают беспрецедентную мощность КК, которой удалось достигнуть в процессе исследования. По словам ученых, комбинация размера системы, глубины схемы и квантового управления привела к качественному скачку: производительность системы при решении задачи оказалась выше, чем ожидалось. Перед КК была поставлена задача расчета максимального независимого множества\*. Квантовое решение этой задачи из теории графов с помощью квантово-классического гибридного алгоритма имеет множество прикладных применений в логистике, экономике, финансах и проектировании сетей. Квантово-классический гибридный алгоритм был развернут в замкнутом цикле с прямой автоматической обратной связью с квантовым процессором. Предполагается, что решение задачи с квантовым ускорением прокладывает путь для применения квантовых вычислений в реальных промышленных и социальных задачах [49].

При этом выяснилось, что большое значение имеет архитектура КК, так как, по сути, КК, на котором проводилось решение этой задачи, был проблемно-ориентированным. Это и подтвердил

---

\* В теории графов максимальным независимым множеством, максимальным устойчивым множеством, или максимальным стабильным множеством называется независимое множество, не являющееся подмножеством другого независимого множества. То есть это такое множество вершин  $S$ , что любое ребро графа имеет хотя бы одну конечную вершину, не принадлежащую  $S$ , и любая вершина не из  $S$  имеет хотя бы одну соседнюю в  $S$ . Максимальное независимое множество является также доминирующим в графе, а любое доминирующее множество, являющееся независимым, должно быть максимальным независимым, поэтому максимальные независимые множества также называют независимыми доминирующими множествами. Граф может иметь много максимальных независимых множеств в широком диапазоне размеров. Алгоритм для перечисления всех максимальных независимых множеств или максимальных клик в графе может быть использован как подпрограмма для решения многих NP-полных задач теории графов. Самые очевидные задачи — это задача о максимальном независимом множестве, задача о максимальной клике и минимальном независимом доминирующем множестве.

один из участников исследования. «Глубокое понимание физики, лежащей в основе квантового алгоритма, а также фундаментальных ограничений его классического аналога позволило нам реализовать способы достижения ускорения квантовой машины», — говорит М. Кейн, соавтор исследования из Гарварда [49]. Все участники исследования отмечают важность сопоставления проблемы и квантового оборудования, что играет ключевую роль в эффективном применении квантовых вычислений. Чтобы добиться максимальной эффективности, как полагают ученые, необходимо, чтобы архитектура системы соответствовала поставленной проблеме. Это и свидетельствует об использовании проблемно-ориентированного КК. В этой связи генеральный директор компании *QuEra Computing* и соавтор работы подчеркнул: «Мы очень рады видеть, что квантовые вычисления начинают достигать необходимого уровня зрелости, когда аппаратное обеспечение может помогать разрабатывать квантовые алгоритмы, выходящие за рамки того, что можно предсказать заранее с помощью классических методов вычислений. Более того, крайне обнадеживает наличие квантового ускорения при решении сложных задач» [49].

### Заключение

В мире технологий сенсации редко рождаются в одночасье. Они являются результатом десятилетий исследований, разработок и настойчивости [51]. Это полностью относится и к квантовым вычислениям, которые приближаются к значительному прорыву, поскольку прогресс, достигнутый за последние годы, удивителен. И хотя квантовые компьютеры все еще находятся на ранних стадиях развития, они уже достигли некоторых замечательных результатов, которые были невообразимы несколько лет назад. Приведем три примера [51]:

**Пример 1.** В 2019 г. *Google* объявила, что ее КК *Sycamore* решил проблему, на решение которой классическому компьютеру потребовалось бы 10000 лет. Это стало важной вехой в развитии квантовых вычислений и показало, что КК могут решать задачи, которые далеко за пределами досягаемости классических компьютеров.

**Пример 2.** В 2021 г. исследователи из Университета науки и техники Китая использовали КК для моделирования поведения молекулы фтористого водорода. Это был первый случай, когда КК был использован для моделирования молекулы, состоящей более чем из двух атомов.

**Пример 3.** В 2022 г. исследователи из Университета Торонто использовали КК для разработки нового алгоритма машинного обучения. Этот алгоритм более эффективен, чем традиционные алгоритмы машинного обучения, и он может революционизировать то, как мы ис-

пользуем машинное обучение для решения проблем.

Траектория развития квантовых вычислений схожа с траекторией развития ИИ, и эта область созрела для инноваций и открытий. Прорыв в квантовых вычислениях может по-новому определить ландшафт вычислений. Путешествие было долгим, но квантовый момент успеха может оказаться ближе, чем мы думаем, и потенциальное воздействие может быть очень глубоким. Многие организации могут оказаться неподготовленными, им не хватит соответствующих людей, процессов, чтобы использовать эту новую технологию. Когда наступит момент квантового успеха, организации могут запаниковать, осознав, что им не хватает инфраструктуры и опыта для использования мощи КК. Чтобы российским компаниям (таким, например, как Газпром, Ростех, Роснефть и др.) не быть застигнутыми врасплох, можно следовать плану (дорожной карте) по подготовке к эре квантовых вычислений [51]:

- Просвещать и обучать. Инвестировать в образование и профессиональную подготовку, чтобы создать квалифицированную в области квантовых вычислений рабочую силу. Это включает в себя не только техническую подготовку, но и формирование культуры непрерывного обучения.

- Сотрудничать и выстраивать партнерские отношения. Сотрудничать с академическими кругами, исследовательскими институтами и лидерами отрасли. Партнерские отношения могут ускорить внедрение инноваций и обеспечить доступ к передовым технологиям.

- Инвестировать в исследования и разработки, выделять на них ресурсы. Эксперименты и инновации — ключ к тому, чтобы оставаться на шаг впереди.

- Разрабатывать стратегический план (дорожную карту). Создать четкую и стратегическую дорожную карту для интеграции квантовых вычислений в науку, производство и бизнес. Это включает в себя понимание потенциальных приложений и приведение их в соответствие с целями (в том числе, и с бизнес-целями).

- Учитывать этические соображения: квантовые вычисления, как и ИИ, вызывают вопросы этического характера. Организации и компании должны помнить о социальных и этических последствиях этой технологии.

Гиганты квантовых вычислений готовы совершить следующий скачок. Будущее светлое, а возможности безграничны. Но подготовка, дальновидность и стремление к инновациям станут ключом к раскрытию потенциала этого захватывающего рубежа. Поскольку в России мы стоим на пороге квантовой революции в вычислительной технике, организации и госкомпании должны предпринять активные шаги для подготовки к появлению КК и возможности

квантовых вычислений для решения тех сложных задач, которые недоступны для традиционных классических компьютеров, но имеют важное практическое значение. Их примеры будут приведены в части II.

### Литература

1. *Правильщиков П. А.* Квантовый подход к решению задач формальной верификации цифровых схем. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2023. № 1. С. 10—20.
2. *Пшеничный А.* Баснословные деньги вкладывают и Китай, и США, и Япония, но успеха добилась только Россия: развернута первая суперсеть. [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZN23dawPV8yptIs> (дата обращения 19.08.2023).
3. *Перри Р.* Элементарное введение в квантовые вычисления. Пер. с англ.: Учебное пособие. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2015.
4. *Львовский А.* Когда квантовые компьютеры будут доступны для всех? [Электронный ресурс]. URL: <https://postnauka.org/faq/21794> (дата обращения 13.09.2023).
5. IBM анонсировала создание самого мощного квантового компьютера. [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/news/2023/05/26/quantum/> (дата обращения 28.05.2023).
6. IBM обновила дорожную карту развития своих квантовых компьютеров. В планах миллион кубитов после 2023 года. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/news/519312/> (дата обращения 20.08.2023).
7. *Правильщиков П. А.* Использование квантовых компьютеров и квантовых ускорителей в информационных технологиях // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 2, С. 3—12.
8. Unlock the Power of Practical Quantum Computing Today. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dwavesys.com/> (дата обращения 10.08.2022).
9. План выставления на продажу квантовых компьютеров. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Квантовые\\_компьютеры\\_IBM#.D0.9F.D0.BB.D0.B0.D0.BD\\_.D0.B2.D1.8B.D1.81.D1.82.D0.B0.D0.B2.D0.BB.D0.B5.D0.BD.D0.B8.D1.8F\\_.D0.BD.D0.B0\\_.D0.BF.D1.80.D0.BE.D0.B4.D0.B0.D0.B6.D1.83\\_.D0.BA.D0.B2.D0.B0.D0.BD.D1.82.D0.BE.D0.B2.D1.8B.D1.85\\_.D0.BA.D0.BE.D0.BC.D0.BF.D1.8C.D1.8E.D1.82.D0.B5.D1.80.D0.BE.D0.B2](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Квантовые_компьютеры_IBM#.D0.9F.D0.BB.D0.B0.D0.BD_.D0.B2.D1.8B.D1.81.D1.82.D0.B0.D0.B2.D0.BB.D0.B5.D0.BD.D0.B8.D1.8F_.D0.BD.D0.B0_.D0.BF.D1.80.D0.BE.D0.B4.D0.B0.D0.B6.D1.83_.D0.BA.D0.B2.D0.B0.D0.BD.D1.82.D0.BE.D0.B2.D1.8B.D1.85_.D0.BA.D0.BE.D0.BC.D0.BF.D1.8C.D1.8E.D1.82.D0.B5.D1.80.D0.BE.D0.B2) (Дата обращения 28.04.2023).
10. IBM quantum system two. [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/video/preview/7355880264803982788> (Дата обращения 19.08.2023).
11. *Жучков С.* IBM против D-wave: наступила ли эра квантовых компьютеров. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.ru/tehnologii/371669-ibm-protiv-d-wave-nastupila-li-era-kvantovyh-kompyuterov?ysclid=lmjbjrxole336365570> (Дата обращения 05.07. 2023).
12. IBM Quantum's mission is to bring useful quantum computing to the world. [Электронный ресурс]. URL: <https://research.ibm.com/blog/next-wave-quantum-centric-supercomputing> (дата обращения 04.02.2023).
13. *Алексеев В.* Глобальный международный проект свободного доступа к квантовым компьютерам IBM Quantum Experience. [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/XLB4N1XzywCzUzqJ> (дата обращения 10.07.2023).
14. *Детинич Г.* IBM: квантовые компьютеры станут практически полезными раньше, чем ожидалось. [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1088424/ibm-soobshchila-o-stremitelnom-priblizhenii-prakticheski-poleznyh-kvantovyh-kompyuterov> (дата обращения 15.06.2023).
15. *Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. И., Ривест Р. Л., Штайн К.* Алгоритмы: построение и анализ (3-е издание). — СПб.: ООО «Диалектика». 2020.
16. *Ожигов Ю. И.* Конструктивная физика. — М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010.
17. *Губайловский В.* IBM хочет построить квантовый компьютер объемом 100 000 кубит. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.techinsider.ru/science/news-1596343-ibm-hochet-postroit-kvantovyi-kompyuter-obyemom-100-000-kubit/> (дата обращения 10.07.2023).
18. *Шиллинг А.* Квантовый компьютер: Intel инвестирует в спиновые кубиты, работающие при более высоких температурах. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hardwareluxx.ru/index.php/news/hardware/prozessoren/44148-intel-spin-qubit.html> (дата обращения 24.08.2024).
19. *Hiramoto M., Saitoh I, Tsutsui G.* Emerging nanoscale silicon devices taking advantage of nanostructure physics. // IBM Journal of Research and Development. 2006. V. 50. № 3. P. 21—34.
20. *Детинич Г.* Кремний приближает квантовые вычисления — американские учёные добились высочайшей точности спиновых кубитов. [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1063605/kvantovievichisleniya-priblizhaet-kremniy-amerikanskie-uchyonie-dobilis-visochayshey-tochnosti-v-rabote-spinovyh-kubitov> (дата обращения 8.04.2022).
21. *Сурабекянц С.* Intel представила Tunnel Falls — свой первый квантовый процессор с кремниевыми кубитами. [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1088470/intel-predstavila-svoy-perviy-kvantoviy-chip-tunnel-falls-na-osnove-kremnievih-kubitov> (дата обращения 22.08.2023).
22. Вводная по квантовым компьютерам (перевод с сайта Explaining Computers). [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/526886/> (дата обращения 13.09.2023).
23. *Детинич Г.* Intel объявила о готовности к массовому производству квантовых процессоров на кремниевых кубитах. [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1064257/intel-gotova-k-polnomasshtabnomu-proizvodstvu-kvantovyh-protsessorov-na-kremnievih-kubitah> (дата обращения 24.08.2024).
24. Игра для квантовых вычислений IonQ — бесшумный гигант для искусственного интеллекта следующего поколения. [Электронный ресурс]. URL: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.0c0772c4-65032678-64daa9fa-74722d776562/https/www.tradingview.com/news/investorplace:a75f1709d094b:0-quantum-computing-play-ionq-is-the-silent-giant-for-next-gen-ai/](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.0c0772c4-65032678-64daa9fa-74722d776562/https/www.tradingview.com/news/investorplace:a75f1709d094b:0-quantum-computing-play-ionq-is-the-silent-giant-for-next-gen-ai/) (дата обращения 14.09.2023).
25. Компания IonQ представила квантовые компьютеры с микросхемами из стекла. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/news/t/575036/> (дата обращения 27.08.2023).
26. IonQ заявила о создании самого мощного квантового компьютера: новости науки. [Электрон-



ный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/video/preview/4558144099425997145> (дата обращения 27.08.2023).

27. Какой из квантовых компьютеров самый мощный. [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/video/preview/261633153207475023> / (дата обращения 27.08.2023).

28. Newell A., Shaw J. C., Simon H. A. Report on a general problem-solving program. Proceedings of the International Conference on Information Processing. 1959. P. 256—264.

29. Колмогоров А. Н. Автоматы и жизнь. В сб. Кибернетика ожидаемая и кибернетика неожиданная / Под ред. А. И. Берга, Э. Кольмана. — М.: Наука, 1968. С. 12—25.

30. Манин Ю. И. Вычислимое и невычислимое. — М.: Сов. радио. 1980.

31. Виндж В. Технологическая сингулярность // Компьютерра, 1 сентября 2004 г.

32. Ефимов А. Квантовый интеллект. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ng.ru/science/2023-07-13/100\\_2307131350.html](https://www.ng.ru/science/2023-07-13/100_2307131350.html) (дата обращения 16.08.2023).

33. Мьюссер Дж. Первостепенная задача квантовых компьютеров — усиление искусственного интеллекта. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/410777/> (дата обращения 16.08.2023).

34. Квантовый компьютер Google за секунды справился с вычислениями, на которые у «обычной супермашины» ушло бы 47 лет. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/news/746294/> (дата обращения 28.08.2023).

35. Прескилл Дж. Квантовая информация и квантовые вычисления (Том II). — М.-Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский институт компьютерных исследований. 2011.

36. В Microsoft заявили о шаге на пути к созданию надежного квантового компьютера. [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/news/2023/06/26/quantum/> (дата обращения 26.06.2023).

37. Microsoft объявляет дорожную карту для создания первого настоящего квантового суперкомпьютера. [Электронный ресурс]. URL: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.4eee983a-6503279a-5388bdda-74722d776562/https://indianexpress.com/article/technology/tech-news-technology/microsoft-quantum-computer-roadmap-8679811/](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.4eee983a-6503279a-5388bdda-74722d776562/https://indianexpress.com/article/technology/tech-news-technology/microsoft-quantum-computer-roadmap-8679811/) (дата обращения 14.09.2023).

38. Shancland S. Our quantum computer will get 100,000x faster by 2025, Honeywell says. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cnet.com/tech/computing/quantum-computer-will-get-100000x-faster-by-2025-honeywell-says/> (дата обращения 29.08.2023).

39. Джинс Д. Компания Honeywell заявила о создании самого мощного квантового компьютера. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.ru/tehnologii/403439-kompaniya-honeywell-zayavila-o-sozdanii-samogo-moshchnogo-kvantovogo-kompyutera> (дата обращения 30.06.2023).

40. Honeywell Квантовый компьютер. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Honeywell\\_Квантовый\\_компьютер](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Honeywell_Квантовый_компьютер) (дата обращения 29.08.2023).

41. Timmer J. Новый участник рынка квантовых вычислений с уникальной технологией. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/491344> (дата обращения 03.09.2023).

42. Детинич Г. Honeywell заявила о создании самого мощного квантового компьютера. [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1013761/honeywell-zayavila-o-sozdanii-samogo-moshchnogo-kvantovogo-kompyutera> (Дата обращения 30.08.2023).

43. 2021: Honeywell и Cambridge Quantum создали СП для запуска «самого мощного квантового компьютера». [Электронный ресурс]. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Honeywell\\_Квантовый\\_компьютер?usclid=lmk67ee2w278456715](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Honeywell_Квантовый_компьютер?usclid=lmk67ee2w278456715) (дата обращения 13.09.2023).

44. Через два года работу квантовых компьютеров уже нельзя будет проверить на обычных [Электронный ресурс]. URL: <https://cyron.livejournal.com/9550629.html?> (дата обращения 30.08.2023).

45. Новый квантовый процессор и кутриты. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/timeweb/news/596217/> (дата обращения 01.09.2023).

46. Lanyon B. P., Barbieri M., Almeida M. P. and all. Quantum computing using shortcuts through higher dimensions. // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. № 2 (April). P. 2—7.

47. Lanyon B. P., Barbieri M., Almeida M. P. Simplifying quantum logic using higher-dimensional Hilbert spaces. // Nature Physics, V. 5, №. 2. (2008), P. 134—140.

48. Imany P., Jaramillo-Villegas J. A., Alshaykh M. S., Lukens J. M. and all. High-dimensional optical quantum logic in large operational spaces. Quantum Information. V. 5, Article number: 59. Published: 11 July 2019. P. 4.

49. Детинич Г. Группа физиков основала стартап для создания коммерческого квантового компьютера из сотен и тысяч кубитов. [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/1054122/gruppa-amerikanskih-fizikov-osnovala-kompaniyu-dlya-sozdaniya-kommercheskogo-kompyutera-iz-soten-i-tisyach-kubitov> (дата обращения 01.09.2023).

50. Шереметьев А. Ученые достигли квантового превосходства при решении практических задач. [Электронный ресурс]. URL: <https://hightech.fm/2022/05/06/quantum-optimization> (дата обращения 01.09.2023).

51. An Overnight Sensation, 30 Years in the Making: The Parallel Paths of AI and Quantum Computing. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.enterpriseai.news/2023/08/29/an-overnight-sensation-30-years-in-the-making-the-parallel-paths-of-ai-and-quantum-computing/> (дата обращения 01.09.2023).

---

**INTERNATIONAL QUANTUM COMPUTER RACE  
AND QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGY. PART 1**  
(Review)

P. A. Pravilshchikov

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

*The influence of quantum computers and quantum algorithms on the development of information technologies in the context of the quantum revolution in computing and the international quantum-computer race is considered. An overview of the current state of development of quantum computers, quantum algorithms and quantum programming languages are provided. It is emphasized that the creation of quantum computer hardware is only the first half of the path to efficient quantum computing and quantum supremacy. The second half of the journey is related to the development of quantum algorithms. The reasons for the emergence of new computational models are outlined. Concerns regarding the computing power of future quantum computers and quantum accelerators are analyzed.*

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

---

Правильщиков Павел Алексеевич, ведущий научный сотрудник.  
E-mail: pravilshchikov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2023 г.

УДК 654.1

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_3\_19

EDN: TPSKAD

## ДИАЛОГОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАМИ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДОКУМЕНТАЛЬНОГО ОБМЕНА

В. М. Соболев, И. В. Ударцев

АО «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт автоматической аппаратуры им. академика В. С. Семенихина», Москва, Россия

*Рассмотрены вопросы организации исследования телекоммуникационного комплекса специализированной автоматизированной системы документального обмена. Показаны возможности применения аппаратно-программного имитатора, интерпретирующего регламенты абонентского протокола документального обмена. В ходе проведения исследования предусмотрено задание сценариев проверок путем воспроизведения трафика документального обмена. Отмечено, что интерпретатор стал неотъемлемым инструментом проведения предварительных, межведомственных, государственных испытаний для нескольких поколений телекоммуникационных комплексов.*

**Ключевые слова:** абонентская служба, абонентский протокол, телекоммуникационный комплекс, автоматизированная система обмена данными, документальный обмен, виртуальный терминал, язык задания сценариев.

Инновационные достижения в развитии современной элементной базы стимулируют дальнейшее создание перспективных технических компонентов телекоммуникационных комплексов (ТКК). Связанные между собой магистральными каналами ТКК образуют территориально-распределенную автоматизированную систему документального обмена (АСДО) [1–3]. При этом любая модернизация аппаратно-программных средств предполагает проведение обязательного контроля достигнутого качества вновь созданного продукта.

Чтобы обеспечить объективность результатов экспериментов, проверки качества должны происходить на фоне циркулирующей в АСДО формализованной информации (кодограмм, квитанций, служебных посылок и т. п.), разделяющих общие сетевые ресурсы. Однако проведение натурных испытаний с привлечением большого количества терминального оборудования неэффективно. Сбор и учет объемных экспериментальных данных нередко является чрезвычайно трудоемким, а их последующий анализ вручную не всегда объективным. Кроме того, для оперативного аудита данных необходимо привлечение коллектива высококвалифицированных специалистов-профессионалов.

Эффективным научно-техническим решением проблемы оценки качества и объективного получения характеристик ТКК в составе АСДО является создание на базе портативной ПЭВМ имитационно-испытательного комплекса (ИИК) для отладки, проверок, исследования и предъявления готовой продукции при проведении различных видов испытаний, в том числе государственных.

### Имитационно-испытательный комплекс и цели его использования в исследованиях

Парадигмой построения ИИК является воспроизведение абонентской нагрузки, макси-

мально приближенной к реальной, с возможностью оперативного создания требуемого сценария испытания. ИИК представляет собой программный генератор документальных текстовых сообщений и прямых переговоров, имитирующий по интерактивно задаваемым сценариям работу коллектива виртуальных операторов [4], локализованных в границах одного рабочего места.

Аппаратная среда ИИК выполнена в виде многомашинной вычислительной системы с центральным процессором ПЭВМ и установленными в слотах одновременно работающими 24 многофункциональными микропроцессорами 80C186 и коммуникационными контроллерами 82530, сгруппированными в многоканальных терминальных электронных модулях (ТЭМ). Взаимодействие центрального процессора ПЭВМ с ТЭМ происходит через страничный доступ к разделяемой оперативной памяти "окна адресов" [5]. Упрощенная схема организации испытаний ТКК с использованием ИИК представлена на рис. 1, на котором ТГУ — реальное телеграфное устройство, АРМ — автоматизированное рабочее место.

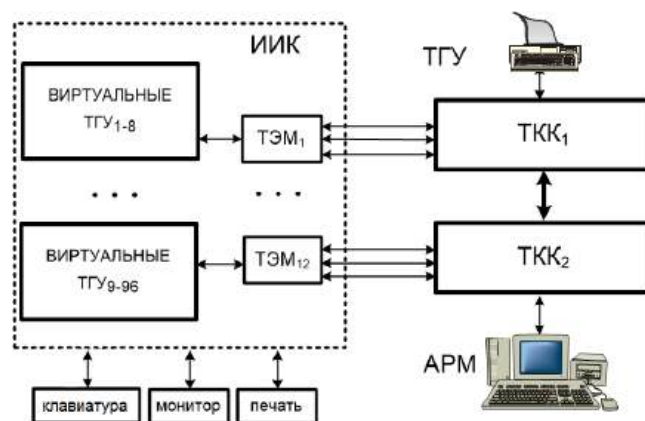


Рис. 1. Схема организации испытаний ТКК

Программные квазипараллельные процессы ПЭВМ под управлением штатной операционной системы и программного генератора случайных событий однозначно воспроизводят стохастическую имитацию одновременного ввода виртуальными операторами множества команд и наборов текста сообщений в телеграфном коде МТК-2 в соответствии с регламентами правил взаимодействия абонентского протокола документального обмена. Все текущие результаты модельного эксперимента оперативно учитываются в ходе проведения испытаний, регистрируются, проходят статистическую обработку данных и селективно под управлением проверяющего лица отображаются на экране монитора в автоматическом или интерактивном режиме. ИИК имитирует одновременную работу требуемого числа операторов для проведения любого представительского эксперимента над исследуемым ТКК, а также автоматически обрабатывает результаты модельного эксперимента по заданным в сценарии критериям.

Программно-аппаратные драйверы в ТЭМ реализуют функционирование виртуальных терминалов, обеспечивая при этом реальное физическое сопряжение — точную аналогию соединения по стандартным асинхронным старто-стопным стыкам.

В общем случае абонентские каналы ИИК могут быть одновременно подключены к нескольким ТКК, образуя на опытном участке сетевой фрагмент АСДО (рис. 2). Этим достигается абсолютная адекватность и полная идентичность взаимодействия между собой всех реальных (Т) и виртуальных терминалов (ИИК).

Предварительная настройка ИИК на требуемый сценарий испытаний производится в диалоговом режиме. С этой целью в ИИК используется банк готовых сценариев, охватывающих широкий перечень проверок с разной топологией опытного участка. Для обеспечения требуемой нагрузки в ИИК предусмотрена возможность варьировать плотность трафика с учетом избирательного, многоадресного и циркулярного адресования сообщений разной категории срочности (приоритетов) и проведения прямых дуп-

лексных переговоров в различном сочетании смешанных обменов. Уровень нагрузки на испытываемые ТКК задается путем установки в ИИК числа передаваемых сообщений в час с каждого виртуального терминала, в том числе по заранее подготовленным и сертифицированным методикам проверки.

Применительно к исследованию ТКК с подключенными к нему абонентскими трактами каждый многопроцессорный комплект ИИК (с учетом конструктивных ограничений на размещение в слотах материнской платы интеллектуальных контроллеров канальных трактов) обеспечивает:

- имитацию одновременного функционирования до 96 виртуальных терминалов под управлением асинхронно и независимо эмулируемых виртуальных операторов;
- создание в диалоговом режиме администратором ИИК групповых или индивидуальных сценариев имитации работы любого виртуального абонента;
- подготовку и хранение различных сценариев модельных экспериментов;
- регистрацию и оперативное отображение на мониторе всех обменов циркулирующей служебной информации и действий виртуальных операторов;
- формирование статистических отчетов о ходе модельного эксперимента.

Натурная проверка и исследование основных функций АСДО, как правило, предполагает асинхронную генерацию в реальных условиях случайных потоков следующих данных:

- симплексных сообщений разной срочности, объема, адресности, отправляемых получателю без предварительного установления связи;
- подтверждений получателем за принятые сообщения, выполняемых вручную с непредсказуемой задержкой во времени;
- дуплексных дипольных текстовых переговоров, одновременно выполняемых текстовых обменов после установления (виртуального) соединения в реальном масштабе времени между любыми парами абонентов.

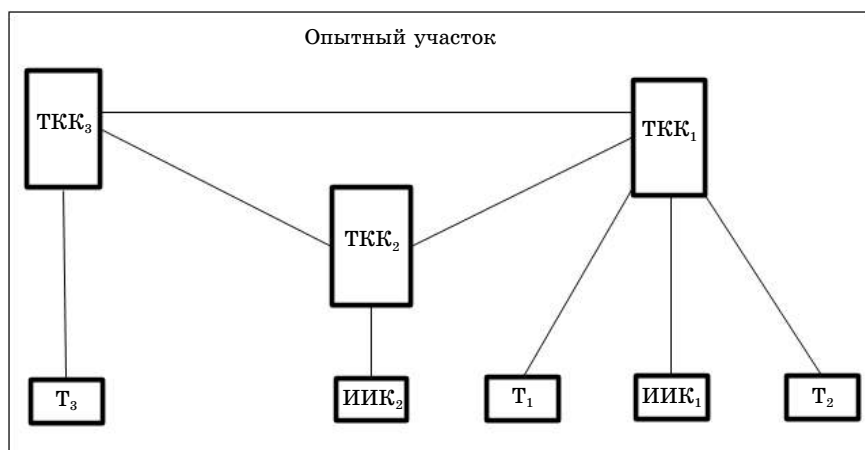


Рис. 2. Опытный участок проверки АСДО

В процессе модельного эксперимента на экране монитора отображается динамика происходящих обменов и ряд текущих статистических данных о ходе работы ИИК:

- число переданных и принятых сообщений и произведенных переговоров;
- число подтверждений и неподтверждений получения сообщения абонентом–приемником;
- число квитанций, полученных абонентом–передатчиком за подтвержденные и неподтвержденные сообщения;
- суммарные результаты доведения сообщения с указаниями идентифицирующих признаков (подтверждено, не подтверждено, занято, отказ, закрыто, авария, отсутствие приемника) и о несанкционированном доступе;
- состояние всех виртуальных установок;
- атрибуты передаваемых и принимаемых сообщений и переговоров и текущие объемы текстов соответствующих сообщений;
- максимальное, минимальное и среднестатистическое время доведения сообщений по категории срочности (КС);
- число сообщений, находящихся на обслуживании испытуемыми объектами;
- число сообщений, недоведенных до получателя или доведенных с искажением текста;
- гистограммы распределения времени доведения сообщений по КС.

Основными целями производимых с помощью ИИК исследований являются:

- автономная и комплексная отладка программных средств ТКК в различных режимах документального обмена (категории срочности, грифа, вариантов передачи), уровня нагрузки (числа сообщений и переговоров в час, генерируемых на каждом виртуальном терминале) и т. п.;
- проверка программного обеспечения ТКК, как системы массового обслуживания в условиях возникновения очередей на обработку сообщений как в отдельном коммутаторе, так и в составе системы передачи данных на базе представительского сегмента АСДО;
- экспериментальный анализ предельной пропускной способности и производительности исследуемого изделия, оцениваемых в метрике числа обслуженных сообщений в течение заданного интервала времени;
- анализ влияния перегрузки на устойчивость функционирования ТКК и изучение реакции и эффективности подсистемы автоматического регулирования нагрузки (возникновение и длительность запретов на ввод новых сообщений);
- создание ситуаций возникновения прерывания (в том числе вложенного прерывания) низкоприоритетных сообщений и переговоров более приоритетными обменами и проверка

корректности последующего доведения прерванных сообщений в указанных обстоятельствах;

- анализ влияния числа неподтвержденных принятых сообщений на временную блокировку вывода и пропускную способность, на своевременность последующего доведения и устойчивость работы ТКК;
- численная оценка информационной надежности по количеству недоведенных (потерянных) сообщений, искаженных сообщений и т. п. в зависимости от нагрузки;
- анализ влияния нагрузки на минимальные, максимальные и среднестатистические вероятностно-временные характеристики (ВВХ) доведения сообщений различной категории срочности.

### Диалоговые средства ИИК

Диалоговые средства ИИК допускают широкую возможность интерактивного управления ходом модельного эксперимента, в том числе позволяют производить:

- запуск и останов по различным условиям модельного эксперимента;
- оперативное изменение вероятностей распределения и значения задаваемых атрибутов;
- оперативное изменение уровня нагрузки (числа генерируемых на каждой виртуальной установке сообщений и переговоров в час);
- ручной набор кодовых фраз для ввода с каждого виртуального терминала;
- просмотр результатов обмена любого виртуального терминала за весь период с начала модельного эксперимента;
- отображение дифференцированной по КС текущей информации о ВВХ выполненных обменов и т. п.

Для проведения динамического тестирования корректности функционирования программ АСДО в различных сценариях устанавливается распределение случайных значений атрибутов КС, грифа сообщения (ГС), варианта передачи (ВП), адресов, объемов сообщений, трафик нагрузки, вероятностные задержки подтвержденных принятых сообщений, прямых переговоров между взаимодействующими реальными и виртуальными парами абонентов и т. п.

Диалоговые средства ИИК построены в технике "всплывающих окон" меню с использованием функциональных клавиш. Они обеспечивают возможность формирования сценария и управление ходом проведения модельного эксперимента.

В диалоговом окне СЦЕНАРИЙ (рис. 3) можно создавать новый сценарий или редактировать ранее созданный.



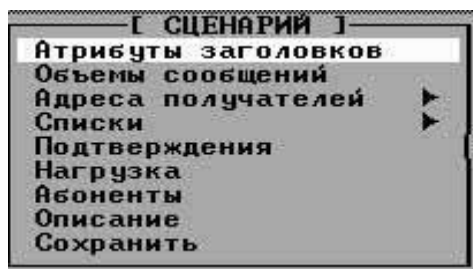


Рис. 3. Окно СЦЕНАРИЙ

С помощью меню этого окна можно задавать атрибуты заголовков, объемы сообщений, адреса и списки адресов получателей, вероятности подтверждения сообщений, нагрузку (количество генерируемых сообщений) и т. д.

Окно АТРИБУТЫ ЗАГОЛОВКОВ (рис. 4) позволяет задавать процентную вероятность распределения генерируемых сообщений по КС, ГС и вариантам избирательной или многоадресной ВП.



Рис. 4. Окно АТРИБУТЫ ЗАГОЛОВКОВ

На конечном множестве абонентов сети  $A_{var} = \{a_1, \dots, a_n\}$ , участвующих в модельном эксперименте, установлено отношение получателей  $\psi: A_{rec} \rightarrow S_{adr}$ ,  $A_{rec} \subseteq A_{var}$ , в котором  $S_{adr} = \{s_g, \dots, s_q\}$  — множество списков  $s_g = \{a_k, \dots, a_r\}, \dots, s_q = \{a_v, \dots, a_w\}$ ;  $s_g, s_q \in S_{adr}$  адресов получателей, принимающих сообщения от абонентов-отправителей  $a_g, \dots, a_q \in A_{var}$ . В ИИК списки  $s_g, s_q \in S_{adr}$  представляются в виде файлов \*.adr, причем в общем случае  $s_i \cap s_j \neq \emptyset$ .

В окне ОБЪЕМЫ СООБЩЕНИЙ (рис. 5) можно задавать объем сообщений по каждому варианту передачи и категории срочности.

Окно ОБЪЕМЫ СООБЩЕНИЙ содержит следующие параметры:

**Макс об** — максимальный объем сообщения в знаках;

**Мин об** — минимальный объем сообщения в знаках;

**Случ об** — случайный объем в пределах между максимальным и минимальным.



Рис. 5. Окно ОБЪЕМЫ СООБЩЕНИЙ

При выборе команды АДРЕСА СПИСКА появляется окно, позволяющее редактировать и загружать списки адресов получателей (рис. 6).

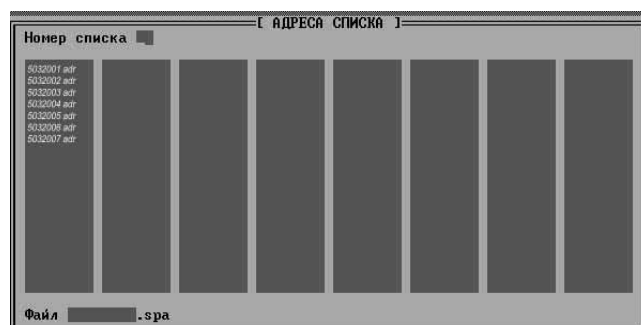


Рис. 6. Окно АДРЕСА СПИСКА

Команда ПОДТВЕРЖДЕНИЕ предназначена для эмуляции процедуры ручного подтверждения оператором принятого сообщения. Окно ПОДТВЕРЖДЕНИЕ (рис. 7) содержит следующие параметры:

**ПТВ** — вероятность подтверждения. С указанной вероятностью абонент — получатель подтвердит принятое сообщение;

**ТЕКСТ** — с заданной вероятностью подтверждение будет содержать текст до 32 символов, например "принял хорошо";

**Задержка** — максимальное время, на которое будет задержана выдача подтверждения;

**Случ** — время подтверждения сообщения, выбранное случайным образом.



Рис. 7. Окно ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

При выборе команды НАГРУЗКА появляется меню, позволяющее задавать количество генерируемых сообщений в каждый период времени в течение суток (рис. 8).



Рис. 8. Окно НАГРУЗКА

Меню окна НАГРУЗКА содержит следующие параметры:

**Сооб/час** — количество генерируемых сообщений в час;

**Реальное время** — привязка к реальному времени.

В диалоговом окне АБОНЕНТЫ можно задавать настройки абонентских каналов. Вид фрагмента окна АБОНЕНТЫ представлен на рис. 9.

Кан	Адрес	Скорость	Пароль	ФАП	ФСР	Сост
1	99010049	200	5555	99010049.adr	.sps	3
2	99010050	200	5555	99010050.adr	.sps	3
3	99010051	200	5555	99010051.adr	.sps	3
4	99010052	200	5555	99010052.adr	.sps	3
5	99010053	200	5555	99010053.adr	.sps	3
6	99010054	200	5555	99010054.adr	.sps	3
7	99010055	200	5555	99010055.adr	.sps	3
8	99010056	200	5555	99010056.adr	.sps	3

Рис. 9. Окно АБОНЕНТЫ

Меню окна АБОНЕНТЫ с привязкой к ТЭМ, реализованного в ИИК в виде дополнительного электронного модуля, содержит следующие параметры:

**Адрес** — адрес получателя;

**Скорость** — скорость передачи сообщений (устанавливается в бит/сек);

**Пароли** — набор символов, которые ИИК генерирует на запрос ТКК "открой связь";

**ФАП** — файл адресов получателей, которые доступны для отправки сообщений для данного абонента (см. рис. 6).

**Сост** — начальное состояние абонента, в котором предусмотрено три значения состояния абонента: **З** — закрыт, **Н** — нет данного абонента, **Р** — абонент в рабочем состоянии.

В окне АБОНЕНТЫ отображается ТЭМ<sub>i</sub> из конечного множества контроллеров ТЭМ = {ТЭМ<sub>1</sub>, ..., ТЭМ<sub>m</sub>}, который позволяет связать каждый старт-стопный канал  $K_{\text{ТЭМ}} = \{k_1, \dots, k_n\}$  из состава ТЭМ<sub>i</sub> со списком получателей  $s_i \in S_{\text{adr}}$  (в соответствии с отображением  $\psi: K_{\text{ТЭМ}} \rightarrow A_{\text{snd}} \times S_{\text{adr}}$ , где  $A_{\text{snd}} \subseteq A_{\text{vap}}$  —

множество абонентов-отправителей), используя заданные файлы типа  $a_{\text{snd}}.\text{adr}$ . Файлы типа  $a_{\text{snd}}.\text{adr}$  указывают, с какими реальными или виртуальными абонентами-получателями ( $a_i, \dots, a_j$ ) из состава фрагмента АСДО предполагается взаимодействие отправителей  $a_{\text{snd}}, \dots \in A_{\text{snd}}$  в процессе модельного эксперимента.

Команда СОХРАНИТЬ позволяет сохранить набранный сценарий в файле с расширением \*.scr.

При выборе команды НАСТРОЙКИ появляется окно, позволяющее настраивать генерацию сообщений и вести регистрацию данных для текущего эксперимента (рис. 10).

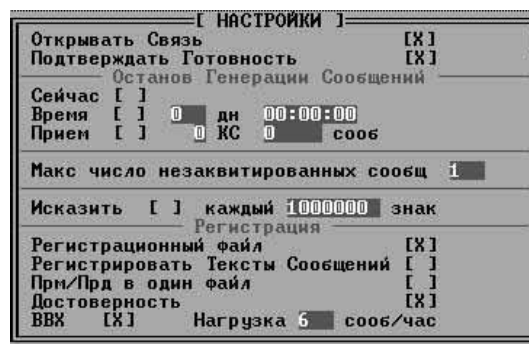


Рис. 10. Окно НАСТРОЙКИ

Меню окна НАСТРОЙКИ содержит следующие пункты:

**Открывать связь** — на запрос ТКК "открыть связь" к соответствующему виртуальному телеграфному устройству (ВТГУ) имитатор автоматически выдает служебную посылку, содержащую численное значение пароля;

**Подтверждать готовность** — на запрос ТКК "подтвердить готовность" к соответствующему ВТГУ имитатор автоматически выдает служебную посылку о готовности (ГТВ);

**Останов генерации сообщений** — остановка процесса проведения эксперимента, при этом остановка может быть реализована тремя способами:

- **Сейчас** — остановить генерацию немедленно;
- **Время** — остановить генерацию по заданному времени;
- **Приём** — остановить генерацию после приёма заданного количества сообщений по заданной категории срочности.

**Максимальное число незаквитированных сообщений** — остановить эксперимент, если ТКК вовремя не обработал (не за квитировал) заданное количество сообщений;

**Исказить** — исказить каждый знак (например, каждый 1000000) текста генерируемого сообщения для проверки достоверности доведения сообщений;

**Регистрационный файл** — регистрация всех исходящих и входящих служебных посылок;

**Регистрировать тексты сообщений** — регистрация текстов сообщений;

**Прм/Прд в один файл** — регистрация принятых и переданных сообщений в один файл;

**Достоверность** — проверка работоспособности ТКК;

**ВВХ** — сообщения должны быть доставлены до получателя с заданной вероятностью в контрольное время;

**Нагрузка** — задаётся количество сообщений в час.

За ходом текущего эксперимента в реальном времени и некоторой статистической служебной информацией можно наблюдать в окне РАБОТА (рис. 11).

ПД/К	Свой	СК	СИ	Прд	К	Г	В	АП/НС	Объем	Прм	К	Г	В	АО	Объем
4/3	50320003	Р	Раб												
4/4	50320004	Р	Пдс	5	0	1	99010035		952						
5/1	50320005	Р	Раб												
5/2	50320006	Р	Раб												
5/3	50320007	Р	Пдс	Ткст	5	0	1	99010039	1632						
5/4	50320008	Р	Раб												
6/1	50320009	Р	Пдс	5	0	1	99010041		1904						
6/2	50320010	Р	Раб												
6/3	50320011	Р	Раб												
6/4	50320012	Р	Пдс	5	0	1	99010044		136						
7/1	50320013	Р	Раб												
7/2	50320014	Р	Раб												

6/4 : РНС9984 КС5 ГС0 ЕП1 99010044 ЧАС115656  
17/4 : 123 4567 8901 2345 6789 0123 4567 8901 2345 6789  
0123 4567 8901 234

Tab - Прм/Прд Enter - Канал F2 - Статистика F7 - Управление F10 - Выход

Рис. 11. Окно РАБОТА

В окне "Работа" отображается следующая информация:

**РНС** — регистрационный номер сообщения;

**Прд** — общее число сообщений, переданных по всем каналам и заквитированных в ТКК;

**Прм** — общее число сообщений, принятых от ТКК;

**Прг** — число установленных переговоров;

**СБР** — число сброшенных сообщений ТКК;

**ПТВм** — число подтверждений за принятые сообщения;

**НПТм** — число не подтверждений за принятые сообщения;

**ПТВд** — квитанции, подтверждённые абонентом-получателем;

**НПТд** — число подтверждённых принятых сообщений абонентом-получателем;

**АВР** — сообщения, которые были сброшены в сети;

**ЗНТ** — квитанции с признаком того, что абонент-получатель в данный момент занят;

**ОТК** — абонент-получатель находится в отпуске;

**ЗКР** — абонент-получатель закрыт;

**НЕТ** — такого абонента-получателя нет;

Состояния каналов имитатора:

**ПД/К** — полудем/канал;

**Свой** — свой адрес абонента-получателя, привязанный к полудему/каналу.

**СК** — состояние канала, в том числе: **Р** — работает, **З** — закрыт, **А** — авария;

**СИ** — состояние имитируемого абонента: **Пдс** — передача сообщений, **Раб** — работает, **Прг** — ведет переговоры.

**ПРД** — текущая передаваемая посылка;

**Г** — гриф сообщения;

**К** — категория срочности;

**В** — вариант передачи;

**АП/НС** — адрес получателя/номер списка;

**Объём** — текущий введённый объём сообщения;

**ПРМ** — текущая принятая посылка;

**АО** — адрес отправителя.

Окно контроля за ходом эксперимента позволяет наблюдать динамику происходящих обменов и ряд текущих статистических данных о ходе работы ИИК. В нижней части экрана с привязкой к соответствующему каналу  $k_i \in K_{\text{тэм}}$  отображаются выводимые на виртуальный терминал текущие стоки данных.

С помощью окна СТАТИСТИКА (рис. 12) текущие результаты эксперимента могут быть проконтролированы в любое время испытаний и использованы для автоматизированного построения отчетов (гистограмм и т. п.).

	КС1	КС2	КС3	КС4	КС5	ВСЕГО
Передано	1	2	0	2	14	19
Принято	0	2	0	0	1	3
Сброшено	1	0	0	2	4	7
не доведено	0	0	0	0	9	9
Принят объем	0	1400	0	0	3000	4400
Ошибки текста	0	0	0	0	0	0
Ошибки объема	0	0	0	0	0	0
Время макс.	00:00:00	00:00:42	00:00:00	00:00:00	00:01:54	
Время мин.	00:00:00	00:00:26	00:00:00	00:00:00	00:01:54	
Время сред.	00:00:00	00:00:34	00:00:00	00:00:00	00:01:54	
Вер-сть (%)	1	3	5	10	81	
Объем (знак)	250	700	1000	1500	3000	

ESC - НАЗД

Рис. 12. Окно СТАТИСТИКА

В окне СТАТИСТИКА обобщенно отображаются максимальное, минимальное и среднее время доведения сообщений по каждой КС и по всем виртуальным ТГУ, а также число переданных и принятых сообщений с указанием суммарного объема переданного в них текста, числа возникших искажений или ошибок в величине объема введенного текста. В нижних строках окна отображаются параметры настройки в зависимости от КС — распределение вероятностей и объемов сообщений.

Каскадное меню справок позволяет получать разнообразную информацию по текущему эксперименту. При выборе пункта меню **КВИТАНЦИИ** всплывает меню справок, которое селектирует статистические данные по различным типам результирующих квитанций (рис. 13).

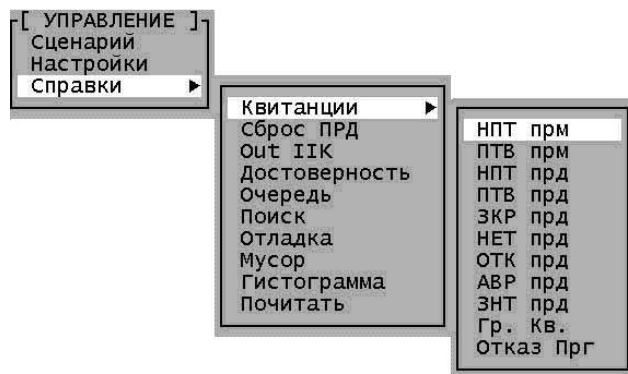


Рис. 13. Каскадное меню справок

Потенциально возможные в ходе эксперимента лексические ошибки и искажения отображаются при выборе пункта **МУСОР**.

Одним из элементов параметризации эксперимента является настройка в ИИК матрицы **М** взаимодействия пар виртуальных абонентов в исследуемой сети АСДО. Матрица **М** определяет информационные связи и вероятностные плотности трафиков между взаимодействующими парами абонентов. Формально  $M = \|\beta_{ij}\|$ ,  $\beta_{ij} = a o_i \rightarrow a p_j$ ,  $i \neq j$  при условии, если отправитель  $a o_i$  взаимодействует с получателем  $a p_j$ , иначе —  $\beta_{ij} = 0$ .

Особое многообразие проверок представляет различные варианты обмена многоадресными, циркулярными многостраничными сообщениями. Так, циркулярными передачами предусмотрена одновременная отправка сообщений в несколько десятков адресов и получение от всех абонентов-получателей введенных вручную подтверждений или автоматическое формирование различных вариантов результирующих квитанций, в том числе не подтверждений, отказов, закрытой связи, занятости, аварийного не доведения, отсутствие абонента. При этом поступление отправителю сообщения от разных получателей индивидуальных результатов обмена (подтверждений) приходит случайным образом в разные моменты времени по мере их отправки. Для удобства отправителя при получении последнего ответа за принятое сообщение от некоего заданного в циркулярном списке абонента-получателя оформляется обобщенная групповая результирующая квитанция, корректность структуры и формата которой также необходимо контролировать в процессе проверок, предусмотренных методикой тестирования.

Для обеспечения информационной надежности системы передачи данных задается допустимая вероятность потери сообщения, обычно связанная с браковкой необратимо искаженной информации, вызванной разными причинами. В проведенных полунатурных экспериментах, наряду с другими, стояла задача проанализировать влияние экстремальной нагрузки на число информационных отказов, под которыми понималась любая потеря (недоставление) сообщения до получателя как из-за истечения времени сеанса обмена, так и в результате несвоевременного возврата получателем (или системой) подтверждения за принятое сообщение. Нагрузка в модельных экспериментах с каждого виртуального терминала монотонно генерировалась случайным потоком, приближенным к пуассоновскому.

Сервисные программы ИИК обеспечивают регистрацию выполняемых обменов, длительное сохранение сообщений и служебной информации с привязкой ко времени, оперативное формирование статистической информации, выдачу гистограмм и результатов поиска данных с возможностью их селекции по регистрационным номерам сообщений, времени, адресам отправителей и получателей, признакам результата доведения, числу получателей сообщения, грифу сообщения, категории срочности и т. п.

С учетом разнообразия абонентских трактов, которые связывают местных и удаленных абонентов непосредственной привязки с транзитными абонентами других ТКК, все проверки, предусматриваемые методикой, осуществляются не только в условиях штатной работы каналов, но и при наличии дестабилизирующего влияния внешней среды (обрывы каналов, наводки и т. п.).

Помимо простейших случаев обмена сообщениями с разными атрибутами (КС, ГС, ВП) значительный объем проверок составляет статическое и динамическое воссоздание коллизий, возникающих при одновременном поступлении на терминал сообщений с разными КС. В общем случае эти ситуации, предусмотренные в абонентском протоколе, приводят к образованию очередей на обслуживание, прерыванию низкоприоритетных сообщений, потенциальной потере сообщений из-за истечения времени сеанса и т.п. С этой целью при полунатурной проверке программ АСДО используют несколько экземпляров ТКК, станций ИИК и реальных терминалов (см. рис. 2), с которых соответствующими операторами организована передача сообщений или ведение прямых двусторонних (дуплексных) переговоров [6—10].

### Модель организации обработки данных в ИИК

Формально программная имитация генерации сообщений и подтверждений в ИИК представлена упрощенной Е-сетью (рис. 14).

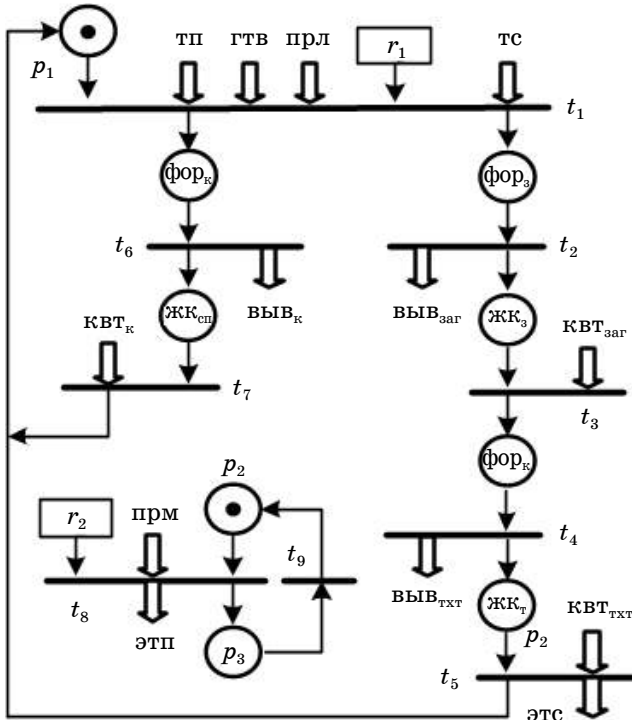


Рис. 14. Генератор сообщений и подтверждений

$E = (P, T, I, O)$ , где  $P \supset Vx \cup \Phi \cup Vy_{\text{х}}$  — множество позиций, в которых  $Vx \supset Vx_1 \cup Vx_2$  [11–13].

$Vx_1 = \{\text{прм}, \text{гтв}, \text{прл}, \text{квт}_{\text{заг}}, \text{квт}_{\text{сп}}, \text{квт}_{\text{тхт}}\}$  — подмножество входных периферийных позиций, интерпретирующих соответственно поступление принятого сообщения от коммутатора, запроса готовности, запроса на ввод пароля, квитанции за заголовок, квитанции за введенную команду, квитанции за введенный текст сообщения.

$Vx_2 = \{\text{тп}, \text{тс}\}$  — подмножество входных периферийных позиций, интерпретирующих соответственно поступление сигнала таймера на формирование подтверждения за принятое сообщение и нового сообщения.

$\Phi = \{p_1, p_2, p_3, \text{фор}_к, \text{фор}_з, \text{жк}_з, \text{фор}_т, \text{жк}_т, \text{жк}_{\text{сп}}, r_1, r_2\}$  — подмножество позиций, интерпретирующих соответственно семафор занятости обработчика данных, семафор макроперехода

поглощения меток, позицию поглощения меток, требование формирования команды, требование формирования заголовка сообщения, ожидание квитанции за заголовок, требование формирования текста сообщения, ожидание квитанции за текст сообщения, ожидание квитанции за ввод команды.

$Vy_{\text{х}} = \{\text{выв}_к, \text{выв}_{\text{заг}}, \text{выв}_{\text{тхт}}, \text{зтп}, \text{зтс}\}$  — подмножество выходных периферийных позиций, интерпретирующих вывод команды, вывод заголовка сообщения, вывод текста сообщения, запуск таймера подтверждения, запуск таймера сообщения.

$r_1, r_2 \in P$  — решающие позиции.

$T = \{t_1, \dots, t_9\}$  — множество переходов, где:

$t_1$  — обобщенный макропереход приоритетно-управляющего типа, срабатывающий при поступлении запросов от коммутатора и таймеров генерации сообщения и подтверждения;

$t_2, t_3$  — переходы, срабатывающие при отправке заголовка сообщения в коммутатор и при поступлении от коммутатора квитанции за заголовок сообщения;

$t_4, t_5$  — переходы, срабатывающие при отправке текста сообщения в коммутатор и при поступлении от коммутатора квитанции за выведенное сообщение;

$t_6, t_7, t_8$  — переходы, срабатывающие при отправке команды в коммутатор, при поступлении от коммутатора квитанции за выведенную команду и при поступлении от коммутатора служебной посылки о принятом сообщении;

$t_9$  — переход поглотителя меток.

Функционирование обобщенного макроперехода  $t_1$  под управлением решающей позиции  $r_1$  определяется процедурой срабатывания, регулирующей генерацию сообщений или выполнение подтверждений. При поступлении в виде входных периферийных позиций запросов готовности  $\mu(\text{гтв}) = 1$  и пароля  $\mu(\text{прл}) = 1$  от коммутатора или сигнала срабатывания таймера подтверждения  $\mu(\text{тп}) = 1$  инициируется формирование соответствующей команды  $\mu(\text{фор}_к) := 1$  (подтверждение готовности, ввод пароля, ввод подтверждения сообщения):

$$\begin{aligned} \Pi(t_1) : (\mu(r_1) = \Phi_r(\text{гтв}, \text{прл}, \text{тп}), \mu(p_1) = 1, \mu(\text{фор}_к), \mu(\text{фор}_з)) \rightarrow \\ \rightarrow (\mu(r_1) := 0, \mu(p_1) := 0, \mu(\text{фор}_к) := 1, \mu(\text{фор}_з) := 0); \end{aligned}$$

При поступлении сигнала срабатывания таймера генерации сообщения  $\mu(\text{тс}) = 1$  инициируется формирование заголовка сообщения  $\mu(\text{фор}_з) := 1$

$$\begin{aligned} \Pi(t_1) : (\mu(r_1) = \Phi_r(\text{тс}), \mu(p_1) = 1, \mu(\text{фор}_к), \mu(\text{фор}_з)) \rightarrow \\ \rightarrow (\mu(r_1) := 0, \mu(p_1) := 0, \mu(\text{фор}_к) := 0, \mu(\text{фор}_з) := 1). \end{aligned}$$



Срабатывание перехода  $t_6$  означает отправку в коммутатор соответствующей команды  $\mu(\text{выв}_k) := 1$ , эмулируемой ИИК. Поступление от коммутатора квитанции  $\mu(\text{квт}_k) = 1$  за введенную команду приводит к срабатыванию перехода  $t_7$ , восстанавливающего разметку семафора  $\mu(p_1) := 1$  для производства очередного цикла передачи сообщения или подтверждения принятого сообщения.

Аналогичным образом описывается срабатывание переходов  $t_2$ ,  $t_3$ , имитирующих отправку заголовка сообщения  $\mu(\text{выв}_{\text{заг}}) := 1$  и получение от коммутатора квитанции за заголовок сообщения  $\mu(\text{квт}_{\text{заг}}) = 1$ . Переходы  $t_4$ ,  $t_5$ , имитируют отправку текста сообщения  $\mu(\text{выв}_{\text{тхт}}) := 1$  и получение служебной посылки от коммутатора  $\mu(\text{прм}) = 1$  за отправленное сообщение, причем срабатывание перехода  $t_5$  приводит к восстановлению разметки семафора  $\mu(p_1) := 1$  и запуску таймера  $\mu(\text{зтс}) := 1$  на генерацию следующего сообщения.

Время срабатывания таймера сообщения  $\mu(\text{тс})$  определяет, согласно заданному сценарию, темп генерации сообщений и задает соответствующую нагрузку на проверяемые коммутаторы.

Срабатывание перехода  $t_8$  происходит под управлением решающей позиции  $r_2$  при поступлении служебной посылки от коммутатора  $\mu(\text{прм}) = 1$  о приеме сообщения. В соответствии с вероятностями, заданными сценарием, решающая позиция имитирует два возможных варианта функционирования  $E$ -сети: запуск таймера подтверждения  $\mu(\text{зтп}) := 1$ , означающий, что принятое сообщение будет подтверждено, причем время задержки подтверждения определяется значением времени срабатывания таймера  $\text{тп} \in \text{Вх}_2$  или поглощение метки  $\mu(\text{прм}) = 1$  и сброс таймера  $\mu(\text{зтп}) := 0$ , означающее не подтверждение принятого сообщения.

Таким образом, стохастические таймеры  $\text{тс}$ ,  $\text{тп} \in \text{Вх}_2$ , индивидуальные для каждого виртуального канала  $k \in K$ , индуцируют циклический характер модельного эксперимента, в ходе

которого имитируются взаимно исключаемые ручные операции ввода нового сообщения или подтверждения полученного сообщения, выполняемые виртуальными операторами. Срабатывание таймера  $\text{тс}_k \in \text{Вх}_2$ , соответствующего каналу  $k \in K$ , запускает для этого канала процесс передачи сообщений (переговоров), который имитирует действия реального оператора, исходя из заданных таблиц сценариев работы ИИК.

По завершении передачи сообщения в очередной текущий момент времени  $\tau_{\text{тек}}$  для канала  $k \in K$  формируется заявка  $\mu(\text{зтс}_k) := 1$ ,  $\text{зтс}_k \in \text{Вых}$  на запуск таймера  $\text{тс}_k \in \text{Вх}_2$  со случайным интервалом времени срабатывания  $D\tau_i$ , генерируемым стохастически, исходя из заданной в сценарии среднего числа заявок в час  $\eta_{\text{сцен}}$ . Таймерная заявка помечена ключом, равным номеру канала  $k$ . Таким образом, процесс генерации создает случайный поток заявок на обмен, индивидуальный для каждого канала.

### Результаты полунатурных испытаний

Для полунатурных испытаний был выбран один из представительских сценариев, в соответствии с которым:

1. Распределение в продуцируемой смеси стохастически генерируемых сообщений с различными значениями КС и объемов текста (число знаков)  $\text{КС1} = 1\%$  (250),  $\text{КС2} = 3\%$  (700),  $\text{КС3} = 7\%$  (1500),  $\text{КС4} = 15\%$  (2000),  $\text{КС5} = 74\%$  (6500, 7500).

2. Подтверждение сообщений — 50 %.

3. Количество сообщений в трафике составляет 80 %, прямых переговоров — 20 %.

4. Значение уровня нагрузки — 6, 9, 12 сообщений в час с каждого виртуального терминала.

5. Скорость абонентских каналов — 50, 100, 200 бит/сек.

6. Скорость магистральных каналов — 1200 бит/сек.

Результаты экспериментов по анализу информационной надежности отображают практически линейную зависимость монотонного возрастания максимального времени доведения  $t_{\text{дов\_тах}}$  отдельных сообщений на начальном (переходном) этапе испытаний (рис. 15).

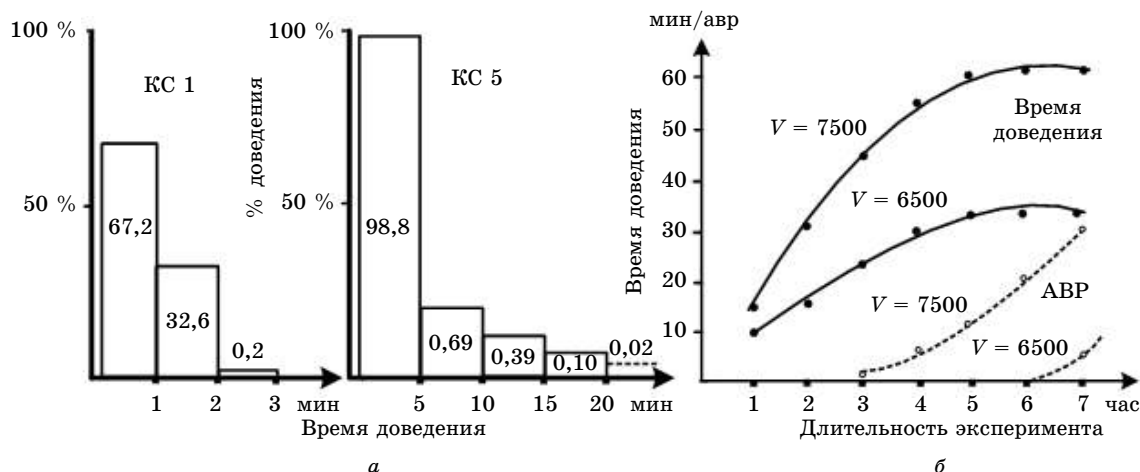


Рис. 15. Результаты экспериментов:

а — гистограммы распределения времени доведения сообщений по КС;  
 б — зависимость времени доведения сообщений от длительности эксперимента

Однако на стационарном этапе эксперимента достигается предельная граница (насыщение)  $t_{\text{дов\_max}}$ , за счет ограничения по времени, которое контролируется сеансовым таймером, закрепленным за каждым сообщением.

Об этом явлении свидетельствует всё возрастающее количество недошедших сообщений, регистрируемых с результирующим признаком аварии (АВР), причем усредненное время доведения остается практически постоянным. Причины не доведения сообщений (потерь) вызваны несбалансированностью пропускной способности магистрального канала ТКК с объемом информации, вводимой в него абонентами. Поэтому сбалансированность суммарных скоростей магистральных и абонентских каналов, прямо влияющая на качество обслуживания транспортной сети документального обмена, должна всесторонне учитываться в привязках всех действующих и развертываемых узлах связи.

Упрощенно, для исключения информационного переполнения в системе в общем случае

$$\text{должно соблюдаться неравенство } \sum_{i=1}^{i=n} v_{\text{mki}} \geq$$

$\geq (1 - \xi) (1 + \xi) v_{aj}$ , где  $v_{\text{мк}}, v_a$  — скорости магистральных и абонентских каналов коммутатора,  $\xi \approx 0,3$  — коэффициент сопроводительной служебной информации, дополняющий содержательную часть текста сообщения в каждой кодограмме, циркулирующей по сети,  $\xi \approx 0,1$  — значение скважности между последовательно отсылаемыми сообщениями.

В случае привязки коммутатора к базовой сети обмена данными одним магистральным каналом, усредненное число абонентских каналов (в период часов наибольшей нагрузки при  $\xi=0$ ) не должно превышать значения  $n \leq v_{\text{мк}} / ((1 + \xi) v_a)$ , например, для наиболее типичного случая  $v_{\text{мк}} = 1200$  бит/сек,  $v_a =$

$= 50$  бит/сек,  $n \leq 18$  трактов. Для повышения эффективности транзитных обменов целесообразно использовать методы сжатия информации при ее передаче по среднескоростным магистральным каналам.

Баланс вводимой и выводимой из ТКК информации в основном определяется соотношением скоростей магистральных и абонентских каналов.

Полученные результаты полунатурного моделирования объективно свидетельствуют о том, что среднее время доставки сообщения в современной коммутационной системе фактически не зависит от значения КС сообщения.

Из результатов экспериментов полунатурного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Для абонентов непосредственной привязки среднее время доставки сообщения (с момента отправки полностью введенного сообщения до момента начала его поступления на приемную сторону) в современной коммутационной системе слабо зависит от значения категории срочности;

2. Время ввода сообщения передатчиком и последующее время вывода сообщения приемником при среднестатистических объемах сообщений, как правило, значительно превышает время его доставки;

3. При не подтверждении половины принятых сообщений среднее время доведения сообщений и пропускная способность КДО по сравнению со 100 % подтверждением практически не изменяется, однако существенно увеличивается максимальное время доведения отдельных сообщений — в 3÷5 раз;

4. При уровне нагрузки более 10 сообщений в час с каждого терминала наблюдается монотонное увеличение среднего и максимального времени доведения, потенциально приводящее к истечению допустимого времени сеанса и аварийному завершению обслуживания сообщения;

5. Среднее и максимальное время доведения сообщений с высокой КС практически не изменяется в течение всего эксперимента, а максимальное время доведения отдельных сообщений с низкой КС достигает часовой задержки за счет всевозрастающей очереди к магистральному каналу связи между ТКК (см. рис. 2);

6. При повышении интенсивности трафика наблюдаются однократные прерывания низкоприоритетных сообщений более приоритетными, автоматически приводящие к повторам вывода прерванных сообщений. Также возникают сигналы запрета на ввод очередных сообщений из-за перегрузки магистрального канала связи.

Заметим, что невыполнение своевременного подтверждения приводит к аварийному сбросу части уже доставленных сообщений из-за истечения времени сеанса. Причина этого негативного явления связана с блокировкой вывода сообщений низкой КС, которая используется при наличии двух и более предварительно принятых, но все еще неподтвержденных сообщений. Блокировка используется для обеспечения информационной безопасности (то есть блокировка вывода сообщений производится, когда нет своевременных подтверждений ранее принятых сообщений).

Основываясь на полученных результатах, можно заключить:

1. При создании систем электронной коммутации шкалу градаций сообщений по КС возможно существенно сократить без потери эффективности их доведения;

2. Искусственная блокировка вывода принятых сообщений 3÷5 КС неэффективна и потенциально может приводить к их аварийному сбросу;

3. Не ранжированное по категориям срочности обслуживание магистральных очередей транзитных сообщений 3÷5 КС, установленных в общую очередь в порядке поступления, при перегрузках канала связи потенциально приводит к истечению сеанса и потере сообщения;

4. На практике крайне редко происходит прерывание несрочных сообщений более приоритетными, поэтому их программный контроль следует упростить;

5. Перегрузка коммутационной системы транзитными сообщениями происходит за счет несбалансированности скорости и числа используемых магистральных каналов связи и количества передаваемых абонентами транзитных сообщений.

### Заключение

В целях повышения качества, надежности и эффективности функционирования программных средств ТКК проведены полунатурные испытания с использованием стохастического ИИК, эмулирующего работу виртуального мно-

жества операторов на общем информационно-адресном пространстве фрагмента АСДО. Получены экспериментальные данные вероятностно-временных характеристик доставки сообщения, пропускной способности и информационной надежности ТКК при организации стохастического трафика сообщений разной КС и объемов, величины нагрузки виртуальных установок и т. п.

В качестве достоинств ИИК отмечается адекватность физического сопряжения с ТКК, автоматизация регистрации и статистической обработки, оперативного отображения результатов модельного эксперимента, приемлемая портативность (переносимость) конструктивного исполнения ИИК, не требующего громоздкого оборудования и обширных площадей.

По результатам экспериментов показано, что проблема обеспечения информационной надежности обмена сообщениями в сети АСДО в условиях отсутствия внешних дестабилизирующих факторов целиком зависит только от сбалансированности пропускной способности магистральных каналов связи со значениями объемов вводимой абонентской нагрузки.

Полунатурные испытания позволили преодолеть основные ограничения, свойственные аналитическим моделям, и получить достоверные результаты.

### Литература

1. Зацаринный А. А. Комплексный системный подход — основа научно-технической политики Управления начальника связи ВС РФ // Тематический сборник, посвященный 85-й годовщине Войск связи. 2004. С. 30—40.
2. Зацаринный А. А. Академик И. А. Мизин: военная наука и практика: сб. Игорь Александрович Мизин — ученый, конструктор, человек / Под ред. акад. Соколова И. А. — М.: ИПИ РАН. 2010. С. 96—128.
3. Соболев В. М. Об инфологии документального обмена // Информационные технологии и вычислительные системы. 2023. № 2. С. 3—17.
4. Соболев В. М., Ударцев И. В. Имитатор абонентской нагрузки для тестирования и испытания коммуникационных комплексов документального обмена // Качество и жизнь. 2016. № 53(11). С. 41—46.
5. Соболев В. М., Матюхина Е. Н. Об организации межпроцессорного обмена в комплексах АСУ ТП // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 5. С. 7—11.
6. Соболев В. М., Ударцев И. В. Организация полунатурного тестирования и моделирования коммуникационных комплексов передачи сообщений специализированной сети документального обмена // Промышленные АСУ и контроллеры. 2018. № 5. С. 27—35.
7. Соболев В. М. Обслуживание сообщений и переговоров в сети специального назначения // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 1. С. 62—70.
8. Соболев В. М. Автоматизированная станция проверки исполнения абонентского протокола специализированной коммуникационной сети // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2023. № 1. С. 34—41.

9. Зайончковская Д. А., Матвеев Р. В. Обеспечение комплексных проверок функционирования изделий разработки АО "КНИИТМУ" в составе АКСС: Труды XVIII Российской НТК "Новые информационные технологии в системах связи и управления". — Калуга: Изд-во: ООО "Ноосфера". 2019. С. 111—113.

10. Рыжов А. С. Создание программного комплекса для анализа работоспособности устройств в составе автоматизированной системы управления: сб. трудов XIV Российской НТК "Новые информационные технологии в системах связи и управления". — Калуга. 2015. С. 79—85.

11. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: учеб. для вузов. Изд. 3, перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 2001.

12. Сирота А. А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. — М.: Техносфера, 2006.

13. Буренин А. Н. Динамические модели информационных потоков, циркулирующих в мультисервисных сетях специального назначения: труды XII Российской науч.-техн. конф. "Новые информационные технологии в системах связи и управления". — Калуга. 2013. С. 39—41.

## DIALOG MANAGEMENT OF RESEARCH EXPERIMENTS OF AN AUTOMATED DOCUMENT EXCHANGE SYSTEM

V. M. Sobol, I. V. Udartsev

Stock Company "Research Institute for Automated Apparatus  
named after academician V. S. Semenikhin", Moscow, Russia

*The issues of organizing the study of the telecommunication complex of a specialized automated system of documentary exchange are considered. The possibilities of using a hardware and software simulator that interprets the regulations of the subscriber protocol for documentary exchange are outlined. The study involves setting scenarios for checks by reproducing document exchange traffic. It is noted that the interpreter has become an integral tool for conducting preliminary, interdepartmental, state tests for several generations of telecommunications complexes.*

**Keywords:** subscriber service, subscriber protocol, telecommunication complex, automated data exchange system, documentary exchange, virtual terminal, scripting language.

---

Соболь Вадим Маркович, консультант-программист.

E-mail: sobolvm@yandex.ru

Ударцев Игорь Валерьевич, главный специалист центра.

E-mail: ntc\_mob@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 августа 2023 г.

УДК 519.8.004.94

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_3\_31

EDN: TQRHID

## РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЦИИ PLM-СИСТЕМЫ ПРОЕКТА БН-1200 С СИСТЕМОЙ "УРАНИЯ"

С. В. Сумароков, А. А. Кечков

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

И. В. Нетронин, К. В. Комиссаров, Е. Ю. Повереннов, канд. физ.-мат. наук

АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И. И. Африкантова»,  
г. Нижний Новгород, Россия

*Представлено описание модуля интеграции PLM-системы проекта БН-1200 с системой управления данными и процессами расчётных и экспериментальных научных исследований "УРАНИЯ", разрабатываемой в рамках реализующегося в атомной отрасли проектного направления "Прорыв".*

**Ключевые слова:** система "УРАНИЯ", интеграция, PLM-система, БН-1200, расчётные исследования, результаты расчетов.

На современном этапе развития технологий организация проектирования сложных объектов и изделий, особенно при их разработке в атомной промышленности, осуществляется с применением PLM-систем — систем управления жизненным циклом (англ. *Product-life management*). Это объясняется необходимостью соблюдения сроков и эффективного решения задач управления инженерными данными, процессами проектирования, изготовления и эксплуатации объектов и изделий.

При этом для эффективного управления расчётными данными применяются системы класса SPDM (англ. *Simulation Processes and Data Management*), которые заточены под управление расчётными обоснованиями и имеют необходимый для этого функционал.

С целью расширения перечня решаемых задач PLM-системы могут быть интегрированы с системами автоматизированного проектирования (САПР), программными комплексами для проведения математических расчетов, графическими редакторами и другим необходимым в проекте программным обеспечением.

### Требования к интеграции PLM-систем в проектном направлении "Прорыв"

PLM-системы применяются в проектном направлении "Прорыв" [1] при реализации проектов по разработке реакторных установок БН-1200 и БР-1200, а разрабатываемая система управления данными и процессами расчётных и экспериментальных научных исследований "УРАНИЯ" (далее — система "УРАНИЯ") относится к классу SPDM-систем [2]. Система "УРАНИЯ" обеспечивает информационно-технологическую поддержку управления комплексом виртуальных испытаний, которые являются неотъемлемой частью единого процесса проектирования изделий и объектов.

Интеграция PLM-систем с системой "УРАНИЯ" в проектном направлении "Прорыв" позволяет обеспечить автоматизацию взаимодействия инженеров-конструкторов и инженеров-расчетчиков и организацию единой информационной среды [3].

Исходные данные для проведения расчетных обоснований должны формироваться в PLM-системе и затем передаваться в систему "УРАНИЯ". После проведения расчетов по полученным исходным данным система "УРАНИЯ" должна передать полученные ключевые результаты обратно в PLM-систему (рис. 1).

В рамках данной концепции в составе версии 3.0 системы "УРАНИЯ" была реализована функциональная подсистема её интеграции с PLM-системами, используемыми в проектном направлении "Прорыв". В состав данной подсистемы входят следующие модули:

- разработанный в прошлых этапах работ модуль интеграции с информационной системой управления жизненным циклом объектов ПН "Прорыв";
- модуль интеграции с PLM-системой проекта БН-1200;
- модуль интеграции с PLM-системой проекта БР-1200.

К модулям интеграции системы "УРАНИЯ" с PLM-системами проектов БН-1200 и БР-1200 были предъявлены следующие требования по функционалу:

- наличие функции передачи данных из PLM-системы в подсистему хранения и управления данными системы "УРАНИЯ";
- наличие функции обновления исходных данных из PLM-системы;
- наличие функции отправки уведомлений об изменении исходных данных;
- наличие функции передачи ключевых результатов расчётов (отчётных документов) из системы "УРАНИЯ" в PLM-систему.



Рис. 1. Взаимодействие системы "УРАНИЯ" с PLM-системой

Данные требования реализуются при разработке соответствующих модулей интеграции и подтверждаются в процессе их тестирования путем решения практических задач, учитывающих особенности процессов разработки конкретного объекта или изделия. Соответственно, посредством внедрения разработанных модулей должны быть реализованы решения по взаимной интеграции рассматриваемых систем.

Далее будет подробно рассмотрен модуль интеграции PLM-системы проекта БН-1200 с системой "УРАНИЯ".

#### Использование модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с PLM-системой IPS для проведения расчетного обоснования

В качестве PLM-системы проекта реакторной установки БН-1200 (его разработчиком является АО "ОКБМ им. Африкантова") применяется версия 6.0.7.2002 программного комплекса IPS (Intermech Professional Solutions). IPS является модульным решением, позволяющим автоматизировать различные производственные и конструкторские задачи — конструкторский документооборот, групповую работу конструкторов и др. Подробно структура и функционал IPS описаны на официальном сайте разработчика PLM-системы — компании "Интермех" [4].

При проведении расчетного обоснования при совместной работе конструкторов и расчетчиков в PLM-системе IPS и системе "УРАНИЯ" (рис. 2) используют модуль интеграции.

Сначала для проведения расчетов в IPS создается версия модели (чертеж или 3D-модель), подлежащей обоснованию расчетными методами. Затем конструктор запускает процесс расчетного обоснования по заранее настроенному в PLM-системе шаблону бизнес-процесса "Проведение расчетного обоснования", в соответствии с

которым должны быть выполнены инициация взаимодействия двух систем и отслеживание статуса расчетного обоснования (рис. 3).

В стартовой задаче конструктор прикрепляет к процессу созданную им версию модели, подлежащей расчету в системе "УРАНИЯ". Количество прикрепляемых конструктором моделей — не более 1. В задаче конструктор указывает также исполнителя — инженера-расчетчика, который должен осуществлять проведение расчета в системе "УРАНИЯ".

Далее модулем интеграции из системы IPS автоматически выполняется ряд действий. В системе "УРАНИЯ" в папке для проведения расчетов создается подпапка, в имени которой указывается номер версии модели. В данной подпапке создаются объекты типа "Цифровой макет" и "Расчетный случай", с помощью ссылок добавляется связь с исходной моделью в IPS. Затем в объект типа "Цифровой макет" из IPS загружаются файлы версии модели, подлежащей расчету.

По окончании импорта версии модели на электронную почту исполнителя — инженера-расчетчика отправляется уведомление с напоминанием о необходимости выполнения расчета, после получения которого исполнитель проводит расчет в системе "УРАНИЯ".

Далее модуль интеграции начинает выполнять мониторинг появившихся изменений в версии модели в IPS и статуса созданного объекта типа "Расчет" в системе "УРАНИЯ".

В случае изменения модулем интеграции версии модели инженеру-расчетчику поступает уведомление об изменении. После получения данного уведомления инженер-расчетчик совместно с конструктором принимают решение о продолжении или прерывании расчета в системе "УРАНИЯ". При прерывании расчета, выполняющегося на текущий момент, инженер-расчетчик присваивает объекту типа "Расчет" статус "Отклонен".

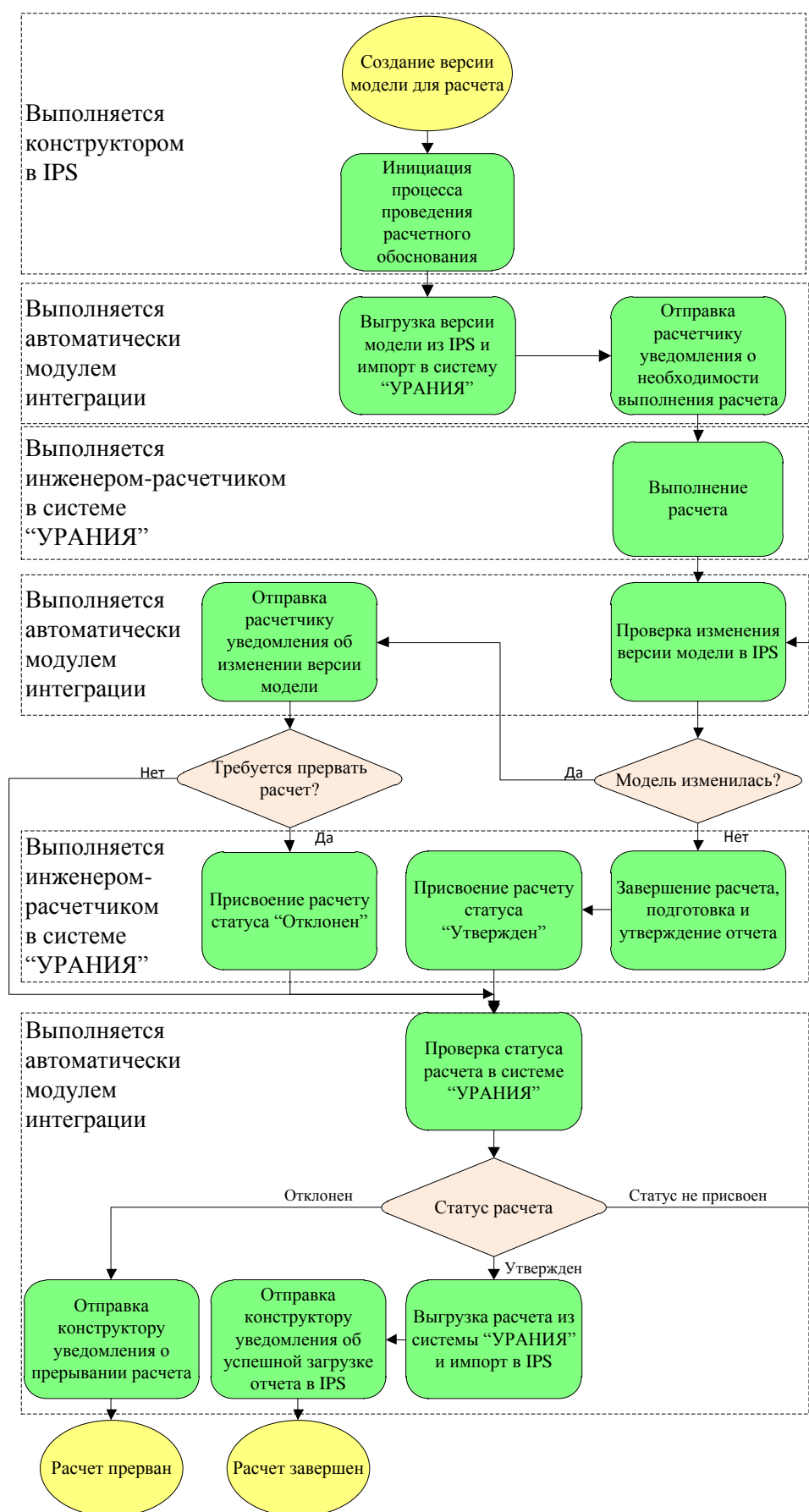


Рис. 2. Схема проведения расчетного обоснования в системе "УРАНИЯ" во взаимодействии с IPS



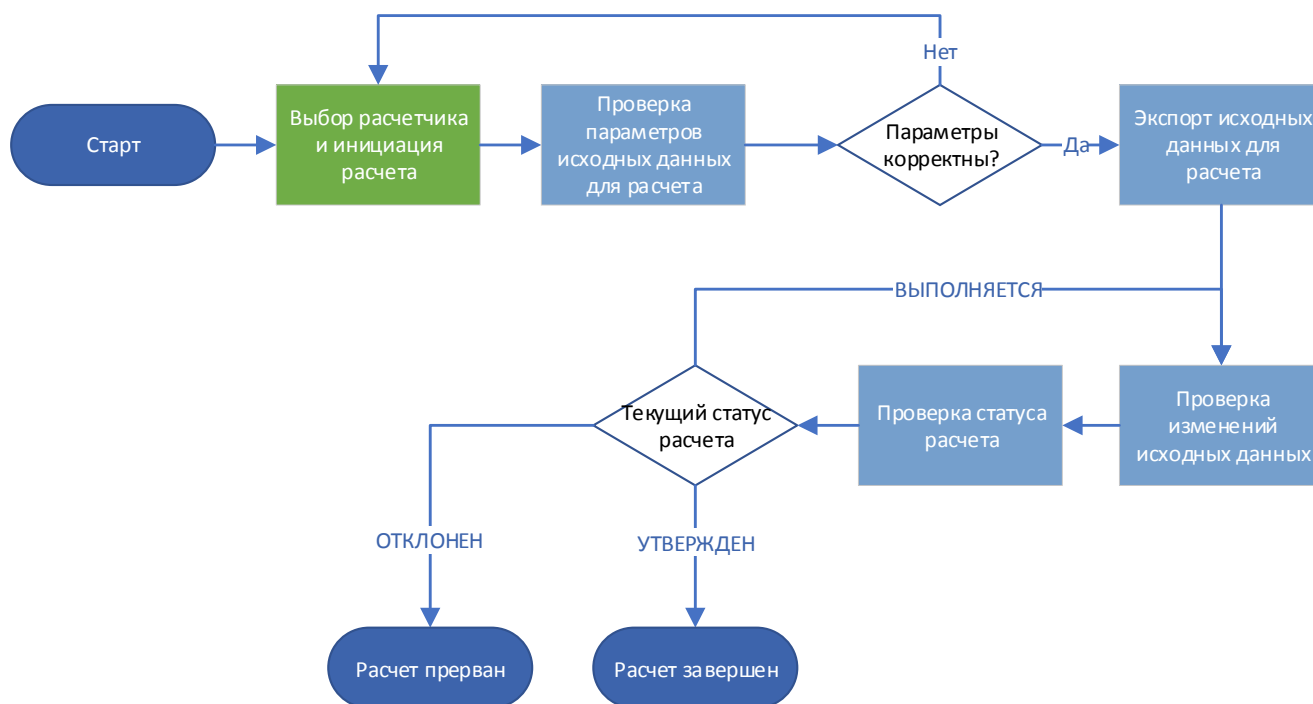


Рис. 3. Схема шаблона процесса "Проведение расчетного обоснования"

По завершению расчета в системе "УРАНИЯ" инженер-расчетчик формирует отчет о результатах проведенного расчета. Сформированный отчет затем утверждается, и ему присваивается статус "Утвержден".

После утверждения отчета инженер-расчетчик присваивает объекту типа "Расчет" статус "Утвержден". Затем модуль интеграции осуществляет поиск утвержденного отчета с результатами расчета, после чего автоматически импортирует его в *IPS*. Конструктор после завершения импорта отчета получает уведомление об успешной загрузке отчета в *IPS*.

Если объекту типа "Расчет" присваивается статус "Отклонен", то модуль интеграции отправляет уведомление конструктору о прерыва-

нии расчета в системе "УРАНИЯ" и прекращает мониторинг изменения версии модели в *IPS* и статуса объекта типа "Расчет" в системе "УРАНИЯ".

При осуществлении повторного запуска на расчет (после прерывания расчета версии модели), модуль интеграции выполняет поиск созданной ранее структуры хранения данных для данной версии в системе "УРАНИЯ". Затем текущий статус объекта типа "Расчет" сбрасывается, после чего в структуру добавляются новые объекты типа "Цифровой макет" и "Расчетный случай".

Для обеспечения структурированного и взаимосвязанного хранения данных определены необходимые структуры и связи в *IPS* (рис. 4) и системе "УРАНИЯ" (рис. 5).

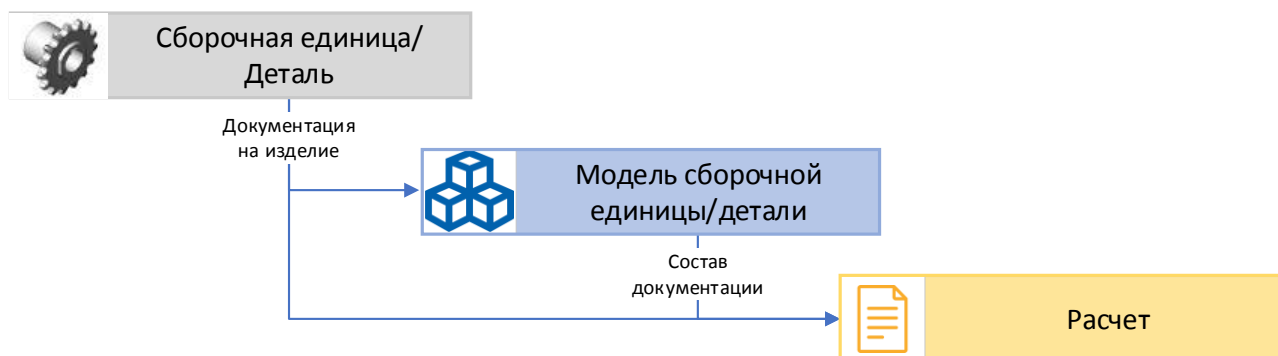


Рис. 4. Связи между типами объектов в *IPS*

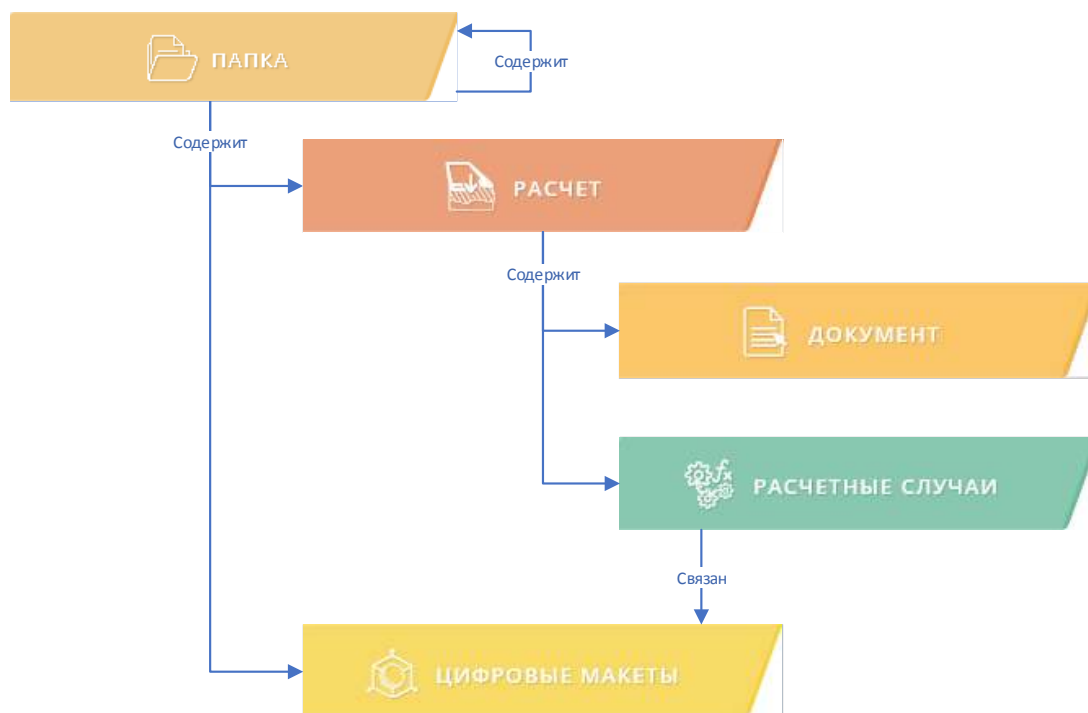


Рис. 5. Связи между типами объектов в системе "УРАНИЯ"

### Программная реализация модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с PLM-системой IPS

#### Структура модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с IPS

Программная часть модуля интеграции системы "УРАНИЯ" представляет собой подключаемую библиотеку ".Net C#", разработанную в среде *Microsoft Visual Studio 2019* на языке C# с использованием технологии *ASP.NET*.

Модуль интеграции включает следующие блоки:

1. "*UraniaServiceConnector*". Блок отвечает за логику работы с данными в *IPS*, получение данных для загрузки в систему "УРАНИЯ", мониторинг изменений модели, отправленной на расчет, загрузку в *IPS* отчета с расчетными данными.

2. "*UraniaWrapper*", "*HttpClient*". Блоки отвечают за взаимодействие системы "УРАНИЯ" с *IPS* путём *REST API* запросов.

3. "*UraniaManager*". Блок реализует работу с данными в системе "УРАНИЯ" — создание объектов, отправку сообщений и исполнителям, проводящим расчеты, проверку статусов.

#### Реализация программных функций модуля интеграции

В ходе реализации модуля интеграции были запрограммированы следующие функции:

- передача данных из *IPS* в подсистему хранения и управления данными системы "УРАНИЯ";

- обновление исходных данных из *IPS*;
- проверка статуса расчета в системе "УРАНИЯ";
- прерывание процесса в *IPS*;
- передача ключевых результатов расчётов (отчётных документов) из системы "УРАНИЯ" в *IPS*.

#### Апробация модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с PLM-системой IPS

В АО "ОКБМ Африкантов" была выполнена проверка разработанного модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с *PLM*-системой проекта БН-1200. Проверка проводилась по заранее подготовленным следующим сценариям:

1. Инициация и выполнение расчетного обоснования с последующей его отменой.

2. Инициация и успешное выполнение расчетного обоснования после изменения *CAD*-данных.

3. Инициация и успешное выполнение расчетного обоснования.

Рассмотрим в качестве примера сценарий "Инициация и успешное выполнение расчетного обоснования".

Для выполнения этого сценария в *IPS* была сделана настройка модели данных и создана деталь с обозначением "18-08-22" (рис. 6). В состав детали добавлена электронная *CAD*-модель "18-08-22ЭМД", созданная в *САПР NX*.

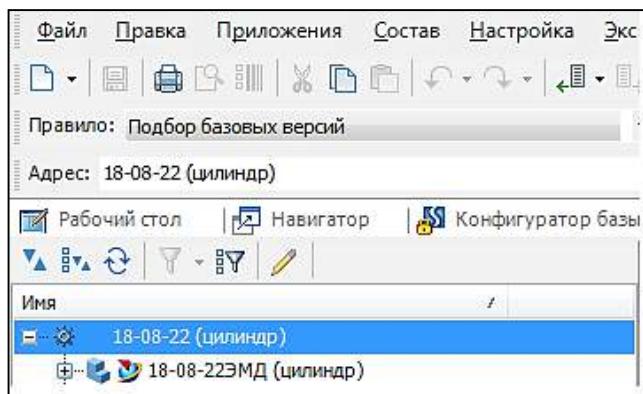


Рис. 6. Деталь в системе IPS

Далее в IPS был выполнен старт процесса проведения расчетного обоснования по шаблону бизнес-процесса "Проведение расчетного обоснования". В качестве исходных данных на первой форме задачи была указана CAD-модель и сведения об инженерере, который должен был провести расчет в системе "УРАНИЯ".

После старта рабочего процесса в IPS в ходе импорта версии CAD-модели в систему "УРАНИЯ" модуль интеграции в соответствии с данными, указанными в конфигурационном файле, создал соответствующие папки, подпапки и объекты и присвоил им значения атрибу-

тов, указанных в специальном объекте IPS, а также задал связи между созданными объектами.

После окончания передачи CAD-модели из IPS в систему "УРАНИЯ" инженер-расчетчик получил сообщение о завершении загрузки исходных данных (рис. 7) и затем выполнил расчет с использованием инструментов системы "УРАНИЯ".

После этого в составе объекта типа "Расчет" системы "УРАНИЯ" был сформирован и загружен отчет с результатами расчета (рис. 8). Объекту типа "Расчет" и созданному в его составе отчету был присвоен статус "Утвержден".

После определения статусов "Утвержден" объектов в системе "УРАНИЯ" модуль интеграции автоматически создал в IPS объект типа "Расчет", а также его связь с версией CAD-модели, которая была изначально передана из IPS в систему "УРАНИЯ". Из системы "УРАНИЯ" в состав объекта "Расчет" автоматически был загружен файл результирующего отчета по расчетному обоснованию (рис. 9).

После завершения всех действий модуль интеграции отправил конструктору, изначально запустившему процесс в PLM-системе, сообщение об окончании расчета в системе "УРАНИЯ" и завершении передачи результирующего отчета в IPS (рис. 10).

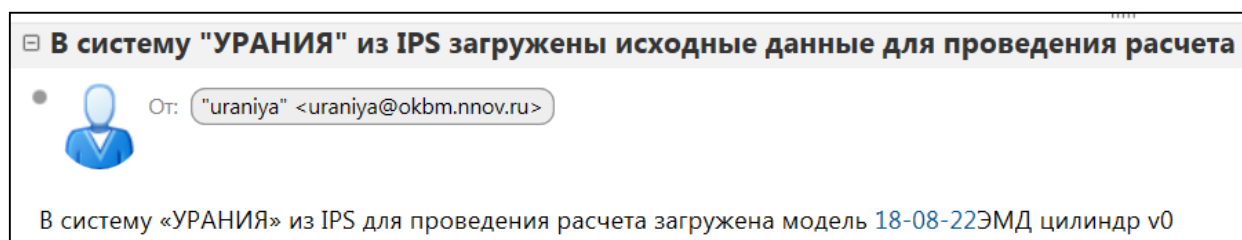


Рис. 7. Уведомление об успешной загрузке исходных данных для проведения расчета в систему "УРАНИЯ"

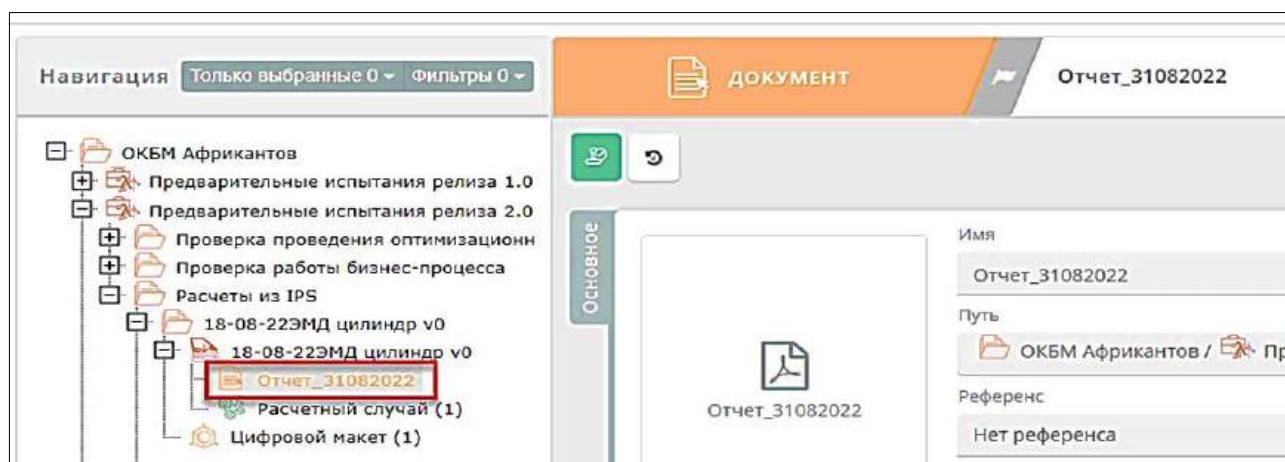


Рис. 8. Расположение отчета с результатами расчета в структуре хранения данных в системе "УРАНИЯ"

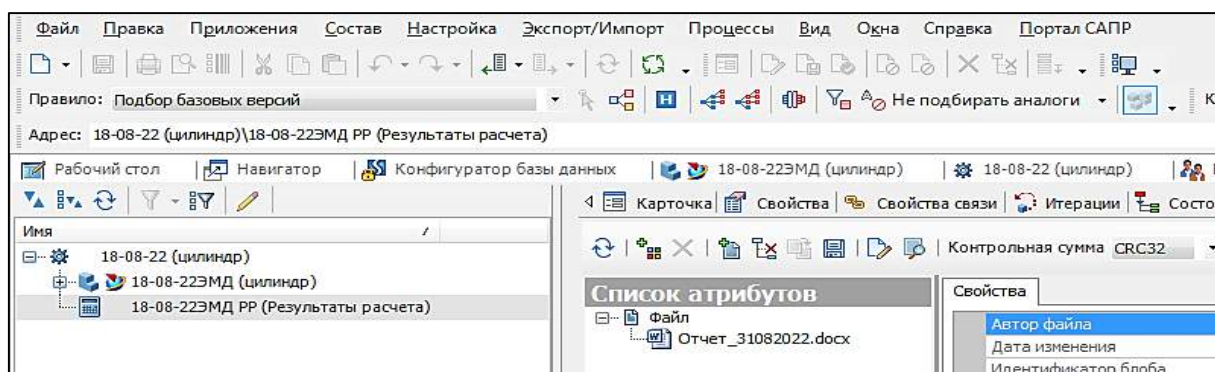


Рис. 9. Структура данных в IPS с отчетом о выполнении расчетного обоснования в составе изделия

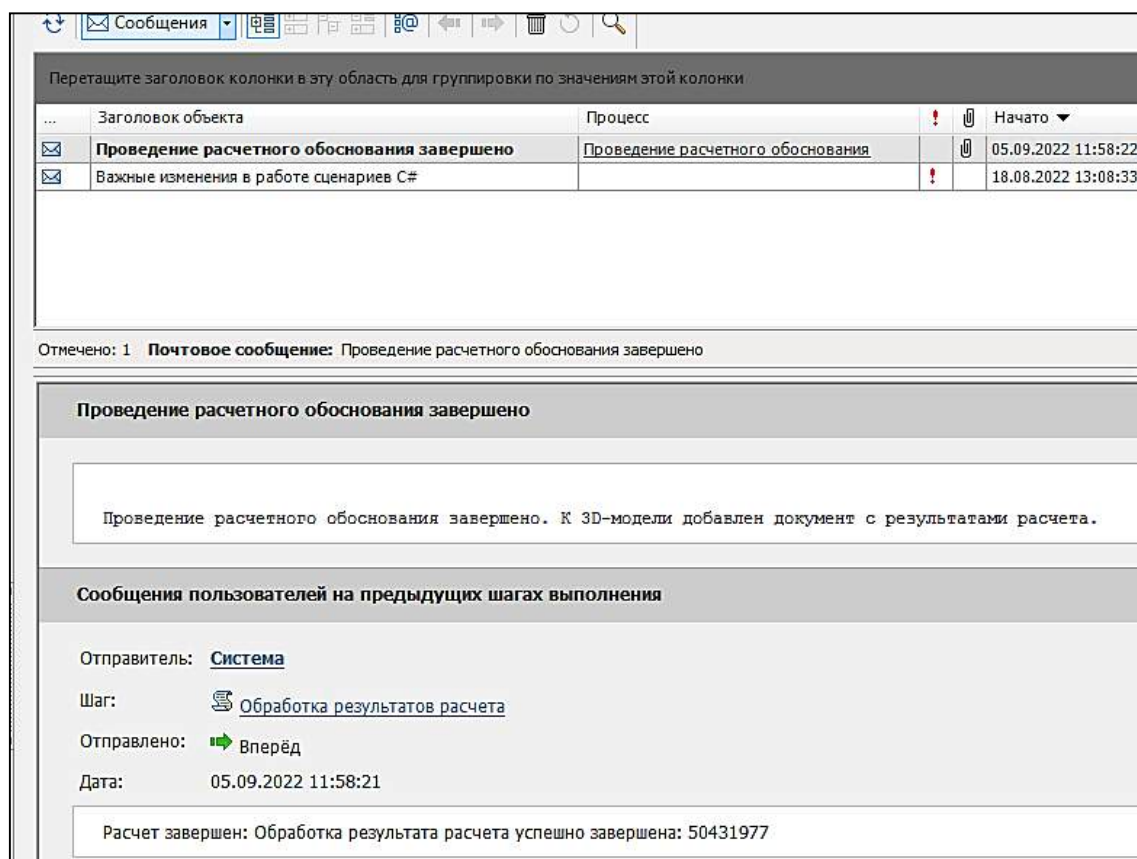


Рис. 10. Уведомление в системе IPS об успешном завершении расчетного обоснования

### Заключение

Применение PLM-системы и системы класса SPDM по отдельности позволяет повысить уровень автоматизации конструкторских и расчетных процессов, но при этом сохраняются недостатки традиционных способов взаимодействия и обмена данными между конструкторскими и расчетными подразделениями. Разработанный модуль интеграции системы "УРАНИЯ" с PLM-системой проекта БН-1200 позволяет значительно повысить уровень автоматизации взаимодействия между конструкторскими и расчетными подразделениями, обеспечить гаранти-

рованный обмен информацией и отслеживание её актуализации в ходе проводимых расчетных обоснований разработанных конструкторами решений.

Принципы организации хранения, взаимосвязи и отслеживания изменений данных в разных системах, а также программные технологии выгрузки и передачи данных, рассылки уведомлений, использованные при реализации модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с PLM-системой проекта БН-1200, являются универсальными. После некоторой модификации они могут быть использованы для реализации интеграции других PLM- и SPDM-систем.

**Литература**

1. Большов Л. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф., Шмидт О. В. Расчётные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 6. С. 303–312. [Электронный ресурс]. URL: [http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t120-6\\_2016/go,0/](http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t120-6_2016/go,0/) (дата обращения: 20.08.2023).
2. Белокрылов П. Ю., Большухин М. А., Комиссаров К. В., Петрунин В. В., Повереннов Е. Ю. Интеграция процесса расчетного обоснования оборудования реакторных установок в единое информационное пространство для создания цифровых двойников ЯЭУ //

Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 6. С. 309–315. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2947/3103>. (дата обращения: 20.08.2023).

3. Сумароков С. В., Гусев М. В., Кечков А. А., Новосельский Ф. О. Концепция и реализация макета системы управления данными и процессами расчётных и экспериментальных научных исследований // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 1. С. 3–7.
4. IPS Search. Универсальная система управления информацией об изделиях. [Электронный ресурс]. URL: [https://intermech.ru/ips\\_search.html?ysclid=18uq90krjn372778469](https://intermech.ru/ips_search.html?ysclid=18uq90krjn372778469) (дата обращения: 20.08.2023).

## IMPLEMENTATION OF INTEGRATION OF THE BN-1200 PROJECT PLM SYSTEM WITH THE "URANIA" SYSTEM

S. V. Sumarokov, A. A. Kechkov

Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Safe Development of Nuclear Power Industry of the RAS, Moscow, Russia

I. V. Netronin, K. V. Komissarov, E. Yu. Poverennov

Afrikanov JSC "OKB Mechanical Engineering", Nizhny Novgorod, Russia

*This article provides description of the module for integration BN-1200 project PLM-system with the data and processes of computational and experimental scientific research management system "URANIA", developed as part of the "Proryv" project for nuclear industry enterprises.*

**Keywords:** "URANIA" system, integration, PLM-system, BN-1200, computational studies, calculation results.

---

**Сумароков Сергей Вячеславович**, заведующий отделом.

E-mail: [sumarokov@ibrae.ac.ru](mailto:sumarokov@ibrae.ac.ru)

**Кечков Алексей Александрович**, ведущий инженер.

E-mail: [kechkov@ibrae.ac.ru](mailto:kechkov@ibrae.ac.ru)

**Нетронин Илья Викторович**, заместитель генерального директора по операционной эффективности.

E-mail: [netronin@okbm.nnov.ru](mailto:netronin@okbm.nnov.ru)

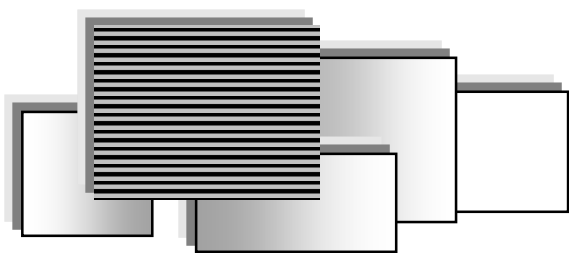
**Комиссаров Кирилл Витальевич**, начальник подразделения.

E-mail: [komissarov@okbm.nnov.ru](mailto:komissarov@okbm.nnov.ru)

**Повереннов Евгений Юрьевич**, ведущий инженер.

E-mail: [poverennov@okbm.nnov.ru](mailto:poverennov@okbm.nnov.ru)

*Статья поступила в редакцию 14 августа 2023 г.*



## ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 681.518.2

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_3\_39

EDN: UHRYNO

### РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛАБОРАТОРИИ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

А. О. Бутко, канд. техн. наук

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

*Представлена автоматизированная система контроля параметров технологических операций лаборатории химической обработки, разработанная в целях повышения качества проведения длительных операций и сокращения временных и ресурсных затрат при производстве деталей двигателей летательных аппаратов. Система включает современные аппаратные средства, а также набор приложений для персональных компьютеров и мобильных устройств. Рассмотрены особенности процесса реализации данной системы, развернутой на предприятии с мелкосерийным производством.*

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

В наукоемком производстве все чаще используют технологии распознавания изображений и нейросети, что связано с повышением качества инструментов в этих областях и наработкой достаточного опыта, дающего возможность оценивать ожидаемый результат от их внедрения. Это приводит к постепенному замещению старых способов решения задач проектирования и производства в таких сферах как авиастроение и ракетостроение, где требуется повышенное внимание к точности и надежности производимых изделий. Особенно это касается элементов двигателей и других ключевых агрегатов летательных аппаратов (ЛА). Основными проблемами тут видятся сложность подготовки материально-технической базы предприятия к внедрению новых инструментов и необходимость обучения персонала работе с ними. Кроме того, с учетом ситуации, связанной с антироссийской санкционной политикой, некоторые зарубежные программные и аппаратные решения могут оказаться недоступными или слишком дорогими, поэтому необходимо искать или оперативно разрабатывать отечественные аналоги таких решений. В предложенном коллективном про-

граммистов и инженеров Московского авиационного института (МАИ) комплексном продукте — системе управления и контроля параметров технологических процессов лаборатории химической обработки ("Система контроля параметров") — присутствуют как доступные зарубежные компоненты, так и элементы собственной разработки.

Необходимость создания комплексного продукта обусловлена чрезмерно большим в современных реалиях процентом брака при производстве некоторых деталей ЛА, что приводит к дополнительным затратам. Особенно это касается операций нанесения покрытий. Данные операции могут длиться по несколько часов, и неправильное их проведение будет означать потерю времени либо снижение качества детали. В любом случае, это может стать причиной срыва сроков поставки всего изделия или, что хуже, к выходу его из строя в процессе эксплуатации. На момент проведения исследований большая часть манипуляций и проверок на предприятии, связанных с контролем над ходом гальванических операций, проводилась специалистами с помощью визуального осмотра, по-



этому можно сказать, что потребность внедрения современных автоматизированных решений назрела давно.

В процессе проектирования и реализации "Системы контроля параметров" для гальванического цеха АО "НПО Энергомаш" им. академика В. П. Глушко в МАИ провели необходимые научные работы и создали лабораторию для отработки и тестирования программного и аппаратного обеспечения. Основной тематикой научно-исследовательских работ стала автоматизация процесса контроля ключевых операций по нанесению покрытий на детали двигателя. Предполагается, что по итогам внедрения "Системы контроля параметров" будет принято решение о разработке аналогичных систем для других цехов предприятия, а в дальнейшем и для других организаций.

### Постановка задачи создания и внедрения "Системы контроля параметров"

Изначально в "Систему контроля параметров" входило три базовых автоматизированных рабочих места (АРМ) — АРМ химика, АРМ технолога и АРМ лиц, принимающих решения (ЛПР). Аппаратную часть системы составили датчики для ванн, сетевое оборудование, комплект для видеофиксации и планшеты для мобильных АРМ. Основным назначением "Системы контроля параметров" является автоматизированная регистрация параметров технологических операций и контроль правильности их проведения.

Для построения "Системы контроля параметров" предварительно была проведена оценка готовности материально-технической базы

предприятия и закупка недостающего оборудования. Для успешного внедрения данной системы необходимо было решить следующие задачи:

- установку датчиков в гальваническом цехе;
- автоматизацию процесса сбора показаний датчиков;
- контроль расположения деталей в ванне;
- выбор технологий для получения и распознавания изображений деталей и оснастки;
- создание программного обеспечения для автоматизации рабочих мест.

На первом этапе работ по созданию "Системы контроля параметров" было проведено исследование текущего состояния материально-технической базы предприятия и выделены части технологического процесса, на которых есть возможность реализовать автоматизированный контроль на основе датчиков и видеоаппаратуры. Для апробации "Системы контроля параметров" были выбраны операции по нанесению покрытий в гальваническом цехе, так как это наиболее длительные и трудно контролируемые действия, требующие проверки большого количества параметров. Например, для одной ванны, в которой производится такая операция, количество параметров может достигать нескольких десятков.

### Решение задач установки датчиков в гальваническом цехе и автоматизации сбора показаний

Структура химической лаборатории представляет собой несколько помещений, включая большой зал с ваннами (рис. 1), где проходит большая часть операций.



Рис. 1. Структура основного зала химической лаборатории (фрагмент главного окна АРМ химика)



В зале установлено два десятка ванн различной конфигурации и пути для перемещения между ними. Освещение стандартное. Некоторые ванны закрываются специальными крышками с автоматическим приводом или без него. Подавляющая часть ванн имеет прямоугольную форму. Помимо главного зала, есть дополнительные помещения, где установлено по нескольку ванн для редких операций.

Основная часть процесса по нанесению покрытий происходит в специальных ваннах, в которые заливается химический состав согласно виду операции. При выборе датчиков, находящихся внутри ванны, необходимо принимать во внимание, что среда может быть агрессивная, кислотная или щелочная, и погружаемый в жидкость материал должен обладать устойчивостью к ее воздействию. Помимо этого, в ванне имеется рама для подвеса детали с соответствующими крепежами и электроды, через которые проходит ток.

В ванны устанавливаются датчики для контроля температуры, состава среды и других показателей. Необходимо также контролировать параметры тока и время нахождения детали в ванне.

Задача установки датчиков и термометров не особо сложна, так как датчики устанавливаются один раз, их передвижение и демонтаж не осуществляют, и они работают без участия человека, передавая данные по сетевому интерфейсу сразу в программу, установленную на рабочем месте мастера. Таким образом, здесь все сводится к правильному подбору датчиков и их монтажу в наиболее подходящих местах оборудования.

В соответствии с техническим заданием мониторинг статических параметров технологического оборудования, независящий от выпол-

няемой технологической операции, включает в себя отслеживание напряжения питания оборудования, температуры, концентрации рабочей среды и параметров потребляемых ресурсов. Плановые значения указанных параметров должны храниться в базе данных (БД) системы.

В соответствии с утвержденным на первом этапе научно-техническим отчетом и другими требованиями был конкретизирован состав статических параметров. В соответствии с ним необходимо осуществлять контроль:

- питающей электросети (напряжение питания и потребление в точках ввода на участок);
- параметров климата (температура и влажность воздуха);
- подачи воды от системы водоподготовки (качество и расход);
- концентрации рабочей среды и других параметров, характеризующих качество рабочих растворов и промывной воды;
- температуры в рабочих ваннах (для определения готовности ванн к работе).

Все эти параметры не зависят от выполняемой технологической операции и допуск на них хранятся в БД в свойствах оборудования.

Дополнительно проводится химический анализ среды в ванне. Ввод результатов химического анализа производится в окне "Химсостав (ввод)" АРМ химика (рис. 2) как вручную, так и путем чтения файлов данных рентгенофлуоресцентного анализатора Shimadzu 7000. АРМ химика и ПО Shimadzu 7000 установлены на одном персональном компьютере (ПК) и настроены на использование одного и того же каталога/папки для хранения данных. Специальное программное обеспечение Shimadzu 7000 сохраняет результаты анализа в формате XLS.

Рис. 2. Окно ввода химического состава

Измерения параметров качества промывной воды в ваннах холодных промывок производится двумя способами. Измерение электропроводности воды в промывной ванне в автоматическом режиме с использованием системы датчиков электропроводности *AnaCONT LCK* с диапазоном от 100 до 2000 мкСм/см устанавливаются в одиночную промывную ванну и во вторую ванну каскада (в ту ванну, в которую поступает вода от линии подачи). Результаты контроля электропроводности промывной воды фиксируются автоматически каждые 10 минут. Возможен просмотр последнего значения и графика изменения параметра за заданный интервал времени.

Измерение параметров воды (электропроводность, водородный показатель, мутность, содержание хлора) осуществляют с помощью погружного многопараметрического анализатора качества воды *Aqua TROLL 500*. Он может быть укомплектован несколькими типами сменных датчиков. *Aqua TROLL 500* можно использовать в качестве портативного устройства для беспроводного сбора данных. В случае стационарной установки анализатор *Aqua TROLL 500* несложно интегрировать с системами управления и телеметрий.

Контроль состояния оснастки выделен в отдельную задачу.

При выявлении критических отклонений параметров работы технологического оборудования от заданных по техпроцессу "Система контроля параметров" информирует об этом ЛППР и оператора технологического оборудования и останавливает некоторые технологические процессы, например, долив воды. Информацию о типе отклонения, параметрах, единице оборудования и времени события сохраняют в соответствующих журналах.

Перечень критических отклонений включает:

- отключение технологического оборудования в результате отсутствия питания от сети переменного тока или отказа;
- недостаточный уровень электролита/воды в процессной ванне (защита от перегрева, защита фильтровальной установки);
- избыточный уровень электролита/воды в процессной ванне (опасность перелива);
- отклонения концентраций компонентов электролита от заданных, а также отклонения по качеству электролита и воды (по данным химического анализа в лаборатории цеха);
- выход параметров технологических операций (параметры постоянного тока выпрямителей, температура электролита/воды, температура нагрева в электропечи) за заданный по техпроцессу диапазон;
- превышение максимального времени обработки детально-сборочной единицы (ДСЕ) для данной технологической операции.

Источники питания гальванических ванн работают в режиме стабилизации тока. При откло-

нении суммарного электрического сопротивления системы "ДСЕ-гальваническая ванна" от нормального состояния ток останется заданным, но изменится напряжение. В настоящее время напряжение на гальванических ваннах не измеряется, и соответственно нет статистики по ваннам и ДСЕ, поэтому сначала система будет набирать статистику по допустимым значениям напряжения для каждой ДСЕ, а далее после этапа опытной эксплуатации появится возможность определять наличие отклонений в технологии по этому признаку.

В целом, сбор показаний с датчиков не вызывает особых трудностей. Основные проблемы могут возникнуть с поставками датчиков зарубежных производителей, поэтому рассматривали отечественные модели и уже имеющиеся на рынке иностранные.

### Решение задачи контроля расположения деталей в ванне

Наибольшую сложность представляет решение задачи контроля расположения деталей в ванне. На данный момент жесткая фиксация практически отсутствует, деталь висит в растворе на металлической балке на специальной оснастке (рис. 3, справа), которая представляет собой металлический крюк (рис. 4) или проводочный подвес.



Рис. 3. Ванна и подвес деталей в ванне на проволоке



Рис. 4. Ванна и подвес деталей в ванне на крюке

Подвес, погружение и дальнейшая проверка правильности положения детали выполняет мастер вручную. Положение детали критически важно для гальванической операции. Крюк поз-

воляет более-менее точно контролировать расположение детали, проволочные подвесы практически не фиксируют деталь.

Другая проблема — мутный состав среды в ванне (рис. 3, слева), из-за которой висящие детали практически не видны при визуальном осмотре. В данном случае контроль сильно затруднен, и решением является только жестко фиксированный подвес в требуемом положении.

На рис. 5 приведен пример контроля расположения ДСЕ. В качестве базы выбираем ближний к оператору край ванны, это ось X. Левый край ванны при этом считаем осью Y.

Исходя из утвержденной номенклатуры могут быть реализованы следующие типы схем расположения ДСЕ в ваннах (рис. 6) в процессе технологических операций [1]:

- Параллельная загрузка. ДСЕ расположены вдоль, два анода перпендикулярно оси расположения ДСЕ.

- Загрузка ДСЕ в клетку из анодов.

- ДСЕ на спецприспособлении. ДСЕ жестко закреплена в оснастке (требования по расположению ДСЕ обеспечиваются конструкцией оснастки, анод располагается внутри ДСЕ).

Регистрация изображений ДСЕ и оснастки, находящихся в ванне, ведется со стационарных камер, расположенных над ванной. Данные изображения обрабатываются в целях верификации правильности расположения ДСЕ в гальванической ванне относительно анодов, контроля наличия необходимого количества анодов с учетом типа схемы расположения.

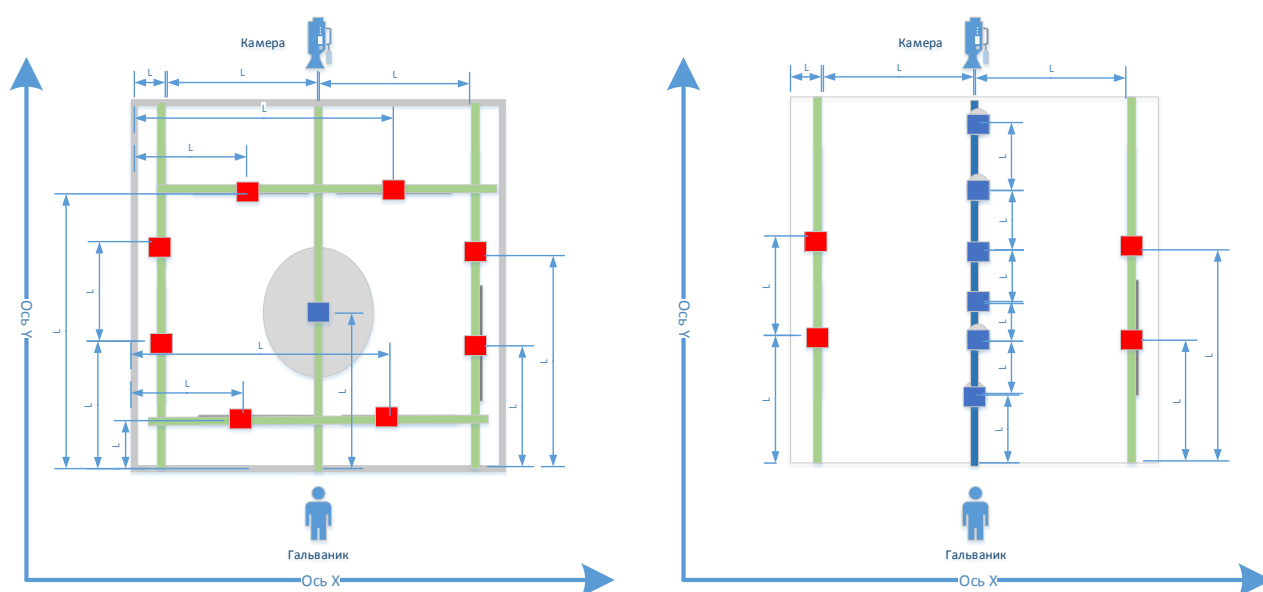


Рис. 5. Контроль расположения ДСЕ



Рис. 6. Типы схем расположения ДСЕ в ваннах

Для контроля расположения ДСЕ в ваннах нормируются следующие показатели [2]:

- расстояние от правой стенки ванны до штанги с анодами по оси  $X$ ;
- расстояние от передней стенки ванны до штанги с анодами по оси  $Y$ ;
- расстояние от передней стенки ванны до мест крепления анодов на штанге по оси  $Y$ ;
- расстояние от передней стенки ванны до мест крепления анодов по оси  $X$ ;
- расстояние от правой стенки ванны до штанги с ДСЕ (катод) по оси  $X$ ;
- расстояния между ДСЕ;
- расстояние от передней стенки ванны до мест крепления подвесов ДСЕ на штанге катода по оси  $Y$ .

Точность распознавания камерой, расположенной на расстоянии 1,8 м от плоскости наблюдения, с учетом всех искажений составляет 10 мм.

Для лучшего распознавания предлагается верхнюю поверхность подвесов анодов пометить красным цветом, верхнюю поверхность оснастки для подвеса ДСЕ — синим цветом.

С помощью мобильных АРМ на ПК или планшете можно загрузить экранную форму с автоматически выбранной схемой расположения, а также фотографировать детали в ванне.

На предварительном этапе проведена тестовая фотофиксация расположения ДСЕ в процессных ваннах. Фотосъемку вели фотоаппаратом *Canon eos600* с объективом *Samyand 28/14* мм с расстояния от 1 до 1,8 м от поверхности электролита при существующем освещении в цеху без использования средств дополнительной подсветки. Было сделано 220 кадров для анализа возможности распознавания расположения ДСЕ в процессных ваннах.

#### Выбор технологий для решения задачи контроля расположения деталей

Изначально предполагалось использовать немецкие видеокамеры, но из-за проблем с поставками были приобретены китайские аналоги. Для обеспечения работы системы распознавания были изучены условия освещенности в зале с ваннами и возможности размещения камер. Из-за наличия в некоторых ваннах агрессивной среды с испарениями подвесить камеру строго над ванной не представляется возможным, поэтому в таких случаях кронштейн был размещен на специальном штативе прямо у края ванны на высоте, обеспечивающей получение изображения требуемого качества. В итоге фотографии получались слегка искаженными в перспективе, что легко исправлялось с помощью библиотек обработки. Перечень ванн для установки камер приведен ниже в таблице.

Перечень оборудования, на котором осуществлен контроль расположения ДСЕ

№	Оборудование	Процесс
1	Ванна 1.1	Электрохимическое обезжиривание
2	Ванна 1.4	Анодное травление
3	Ванна 1.19	Никелирование хлористое
4	Ванна 1.29	Меднение под пайку
5	Ванна 1.30	Меднение для уплотнения
6	Ванна 1.33	Меднение пирофосфатное
7	Ванна 3.4	Серебрение

Для решения задачи контроля расположения с помощью фото и видеофиксации рассматривались два варианта — использование нейросетей и распознавание меток [3—5]. На начальном этапе работ был принят вариант распознавания с помощью меток. Так как для использования нейросетей необходим большой комплект изображений всех возможных положений подвесов для всех деталей, что требует значительного времени, было решено осуществить сбор этого комплекта в ходе пробной эксплуатации системы на месте.

Метки размещают на углах каждой ванны (см. таблицу) и подвесах. Каждая метка представляет собой квадрат 4×4 см с нанесенным надежным способом черно-белым графическим кодом для распознавания. Система работает следующим образом. При нажатии кнопки проверки подвеса деталей на АРМ технолога или мобильного АРМ на планшете камера снимает несколько изображений ванны и подвесов и передает их на сервер, где специальное приложение обрабатывает их и распознает метки. Это дает возможность оценить расстояние до подвеса и его расположение как правильное или неправильное и выдать соответствующее сообщение на индикатор АРМ.

#### Программное обеспечение для автоматизированных рабочих мест

Базовую часть программного обеспечения системы представляет комплект АРМ, построенных на основе *WinCC OA*. В итоговый продукт также вошло несколько вспомогательных и сервисных приложений, которые в данной работе не рассматривали. Подавляющая часть ПО реализована на *C#*.

Каждое АРМ представляет отдельное приложение, совместная их работа происходит через общую базу данных *SQL* на сервере. Исходные данные и показатели АРМ получают напрямую с аппаратного обеспечения либо через сеть с помощью удаленного доступа.

Рассмотрим подробнее АРМ химика, АРМ технолога и АРМ ЛПР.

АРМ химика используют для контроля операций в ваннах и ведения базы данных по ним. С помощью АРМ химика реализуются следующие функции:

1. Планирование работы по обслуживанию процессных ванн.
2. Ведение цифрового журнала состава ванн.
3. Ведение цифрового журнала действий с ваннами.
4. Введение цифрового журнала корректировок состава ванн.
5. Получение, хранение и обработка информации о качестве воды в ваннах и системе водоподготовки.
6. Получение, хранение и обработка информации о проведении вспомогательных технологических операций (долив воды, корректировка состава электролита и др.).
7. Получение данных о результатах мониторинга работы ванн.
8. Блокировка проведения технологических операций и генерация отчетов об останове оборудования по результатам обработки проб.
9. Получение, хранение и обработка данных химического анализа состава рабочих сред в процессных ваннах от энергодисперсионного рентген флуоресцентного спектрометра *EDX-7000 (Shimatzu)*.
10. Получение, хранение и обработка данных химического анализа состава рабочих сред

в процессных ваннах от установленных в них первичных преобразователей.

Интерфейс АРМ химика содержит несколько вкладок с различными конфигурациями элементов управления в зависимости от типа ванны и ее показателей. Пример такой вкладки показан на рис. 7.

При запуске АРМ химика появляется главное окно, которое состоит из рабочего стола, строки меню, панели инструментов, области выбора подразделения (участка) и функционального экрана (мнемосхемы) для работы с оборудованием (процессными ваннами).

Область выбора подразделения предназначена для выбора рабочего оборудования цеха в целях проведения контроля химического состава рабочей среды (для АРМ химика не изменяется).

На функциональном экране отображается оборудование, установленное в выбранном подразделении.

Нажимая на изображение ванны в главном окне, оператор может посмотреть показатели и ее состояние на текущий момент. Кроме того, оно подсвечивается разными цветами для оперативного отображения состояния ванны в главном окне.

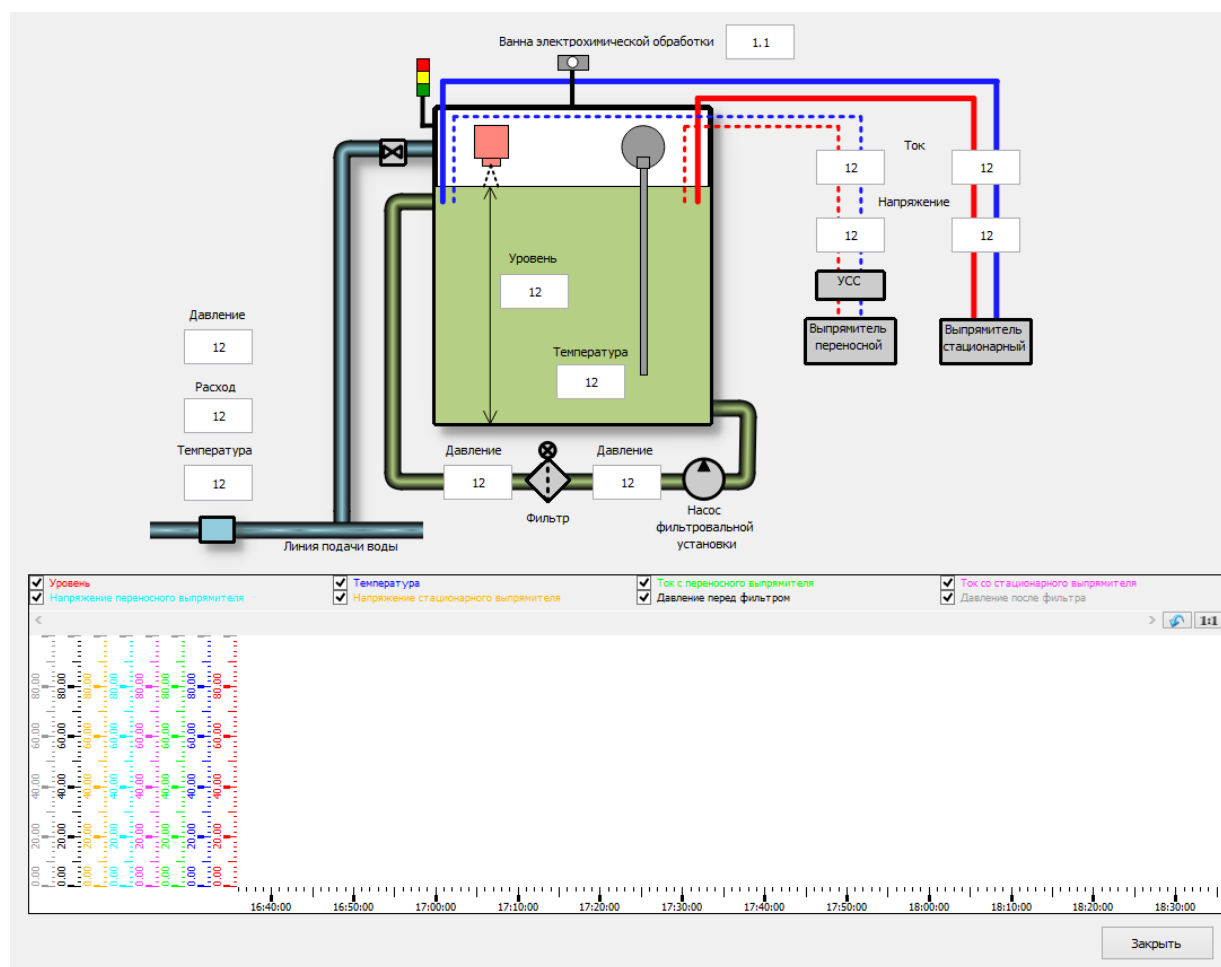


Рис. 7. Фрагмент рабочего интерфейса АРМ химика



АРМ технолога используют для работы с технологическими процессами, хранящимися в электронном виде. АРМ технолога в "Системе контроля параметров" для пилотного участка позволяет:

- на основании группового технологического процесса нанесения покрытия создавать и редактировать единичный технологический процесс нанесения покрытия для конкретной ДСЕ в том случае, если нужная карта технологической информации (КТИ) не поступает из PDM-системы;
- формировать единичный техпроцесс устранения несоответствий в рамках участка.

Этапы работы технолога при использовании АРМ:

1. Идентификация пользователя.
2. Создание шаблонов технологического паспорта.
3. Анализ отклонений от параметров ДСЕ и ТП.

Работа с АРМ начинается с идентификации пользователя по электронному пропуску формата NFC.

Интерфейс АРМ технолога содержит несколько вкладок с различными действиями над техпроцессами и их шаблонами. Пример одной из вкладок показан на рис. 8.

Штатным вариантом ввода техпроцесса в АРМ является загрузка КТИ из Teamcenter. Введенные таким образом в систему параметры будут формировать шаблон технологического паспорта (штПс).

Технолог выбирает из предложенного списка необходимый шаблон и на его основе создает новый техпроцесс. Также технолог может ре-

дактировать уже существующие, но не утвержденные процессы.

АРМ ЛПР используется руководителями для реализации общих функций контроля и мониторинга. К руководству цеха относятся начальник цеха и его заместители по производству и подготовке производства.

Основные возможности, которые предоставляет АРМ руководству цеха:

1. Мониторинг работы цеха по маршрутным картам.
2. Мониторинг работы оборудования.
3. Контроль использования основного технологического оборудования.
4. Контроль состояния оснастки.
5. Контроль наличия отклонений по ДСЕ.
6. Контроль отклонений по оборудованию.

В рамках разработанной для пилотного участка "Системы контроля параметров" лицо, принимающее решение, может:

- снимать любые остановки техпроцесса и аварийные ситуации;
- вносить изменения в ведомость оборудования и БД системы;
- согласовывать формирование техпроцесса устранения несоответствий;
- осуществлять закрытие "цеха-захода" при выявлении существенных несоответствий.

Функции ЛПР доступны во всех АРМ при идентификации оператора как ЛПР. Кроме того, реализовано несколько приложений для мониторинга отдельных параметров технологического процесса, которые представляют собой простые формы с индикаторами и возможностью ведения журнала.

№ Операции	Наименование операции	Оборудование	Использовать	l, A	T, °C	Толщина	Длительность	Примечание
020	Слесарная	Стол монтажный	Выбрана					
025	Изоляция	Стол монтажный	Исключена					Нет изолируемых поверхностей
030_1	Электрохимическое обезжиривание	Ванна 1.1	Выбрана	36,023,6	70±10		812	
030_1	Электрохимическое обезжиривание	Ванна 1.1	Выбрана	36,023,6	70±10		210,3	

Рис. 8. Фрагмент рабочего интерфейса АРМ технолога

Итоговая версия "Системы контроля параметров" включила все упомянутые АРМ и в дальнейшем была доработана с учетом первых результатов эксплуатации. На данный момент все базовые функции системы работают в полной мере.

### Заключение

Первый опыт эксплуатации "Системы контроля параметров" показывает, что с помощью современных программных и аппаратных средств можно заметно повысить качество операций, при выполнении которых ранее очень многое зависело от человеческого фактора, что приводило к появлению большого процента брака. Использование предложенных инструментов и приложений позволяет свести к минимуму участие человека и, как следствие, в целом сократить время проведения некоторых операций.

Описанная структура "Системы контроля параметров" может быть использована для работы не только с гальваническими операциями, но и

с любыми технологическими процессами, где выполняются схожие действия и требуется аналогичный контроль.

В настоящее время система введена в эксплуатацию в АО "НПО Энергомаш" им. академика В. П. Глушко.

### 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. Комплексная автоматизация контроля технологических процессов гальванического цеха // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 1. С. 3—9.
3. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение / под ред. Соколова С. М. / пер. с англ. Богуславского А. А. Изд. 3. — М.: Из-во "Лаборатория знаний", 2015.
4. Фомин Я. А. Распознавание образов: теория и применение. Изд. 2. — М.: ФАЗИС, 2012.
5. Форсайт Д., Понс Д. Компьютерное зрение. Современный подход. — М.: Вильямс, 2018.

## DEVELOPMENT OF ELEMENTS OF THE SYSTEM FOR MANAGEMENT AND CONTROL OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS PARAMETERS FOR CHEMICAL PROCESSING LABORATORY

A. O. Butko

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

*The features of the process of implementing an automated system for monitoring the parameters of technological operations of a chemical processing laboratory deployed at an enterprise with small-scale production in order to reduce the reject rate and reduce time and resource costs in the production of aircraft engine parts are considered. The system includes a set of applications for personal computers and mobile devices and has been put into experimental operation. The main task to be solved is to improve the quality of long-term operations of the technological process through the use of modern software and hardware.*

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

Бутко Антон Олегович, доцент.  
E-mail: mati-tias@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 9 августа 2023 г.



УДК 658.513

DOI: 10.52190/2073-2597\_2023\_3\_48

EDN: UNGMTN

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДАННЫХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕБОВАНИЯМИ В ПРОЕКТНОМ НАПРАВЛЕНИИ «ПРОРЫВ»

О. В. Жданова

Акционерное общество «Прорыв», Москва, Россия

О. Н. Столяров

Акционерное общество «Атомэнергoproject», Москва, Россия

*Статья посвящена вопросу обеспечения качества данных в информационных системах управления требованиями. Рассматривается понятие «качество данных» и дается обзор российских и международных нормативных документов, регламентирующих работу с данными. Описан опыт АО «Прорыв» по имплементации нормативных документов и приведены результаты внедрения процесса по обеспечению качества данных в информационной системе управления требованиями.*

**Ключевые слова:** система управления требованиями, качество данных, проверка данных, автоматизированная проверка данных, менеджмент данных, нормативные документы по качеству данных

В настоящее время широко обсуждается тема нового индустриального уклада, его еще называют Индустрия 4.0 или четвертая промышленная революция. По этой теме написано много статей, и практически во всех отмечается, что новый индустриальный уклад связан с активным использованием информационных технологий (ИТ) не только в экономике, но и в социальной сфере и личной жизни. Среди всего многообразия информационных технологий наибольший вклад в трансформацию экономических и социальных отношений, фактически приравненной к революции, вносят следующие технологии: роботизацию, технологии машинного обучения (AI, ML), интернет вещей (IoT) и большие данные (Big Data). Однако стоит заметить, что эти технологии построены на оперативной обработке огромных массивов данных, и качество принимаемых машинами решений зависит от степени доверия собранным данным. В рамках нового индустриального уклада данные перестают считаться побочным продуктом, а обеспечение их высокого качества превращается в цель бизнес-процессов.

### Понятие качества данных

Качество данных — это обобщенное понятие, которое отражает степень их пригодности к обработке и анализу, при этом под обработкой данных подразумевают перемещение информации из одного источника в другой, приведение данных к одному формату, преобразование информации для хранения в оптимальной форме, а также получение срезов информации в объеме, необходимом для анализа.

Ниже приведен обзор применяемых в российской и международной практике базовых стан-

дартов, в которых затрагиваются вопросы качества данных, с целью дать понимание состава и назначения наиболее значимых регламентирующих документов в этой области.

В соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [1] основными критериями качества являются их полнота, достоверность, точность, актуальность, согласованность, доступность и своевременность.

По вопросам, регламентирующим семантику и терминологию в указанной области, применяется стандарт ГОСТ Р 56215-2014 «Качество данных» [2].

Непосредственно различным аспектам качества данных посвящена группа стандартов ISO/TS 8000 «Data quality» [3] и российская версия этой группы – ГОСТ Р 56214-2014 [4], включающая более 20 спецификаций, к которым сейчас активно добавляются новые. Стандарты группы ISO/TS 8000 определяют следующие характеристики качества данных: согласованность, своевременность, актуальность, целостность, точность, полнота, достоверность.

Показатель согласованности определяет, насколько непротиворечивыми являются данные в различных связанных наборах данных.

Своевременность – показатель, определяющий доступность данных пользователю в нужный момент времени.

Актуальность характеризует степень соответствия данных моделируемой области на определенный момент времени.

Целостность – показатель качества данных, определяющий наличие корректных ссылок между сущностями и соответствие их установленным правилам и ограничениям между сущностями (связи «один к одному», «один ко многим»).

Показатель точности данных определяет необходимый уровень их детализации.

Полнота – показатель качества данных, определяющий достаточность заполнения наборов данных и их атрибутов.

Показатель достоверности необходим, чтобы оценить, насколько корректно данные описывают моделируемую область.

Говоря о нормативах в области обеспечения качества данных, нельзя не отметить всеобъемлющий документ по управлению данными – «Свод знаний по управлению данными» (*DAMA DMBOK*) [5]. Документ особенно будет интересен специалистам, которые намерены серьезно организовать на предприятии работу с данными и максимально использовать те возможности, которые предоставляют ИТ-инструменты четвертой промышленной революции.

В каждом из перечисленных выше нормативных документов отмечается, что качество данных достигается сочетанием организационных и технических методов.

Для претворения организационных методов в жизнь в компаниях используются формальные документы системы менеджмента качества, в которых указываются роли и ответственность владельцев данных, определяется состав критически важных данных и периодичность контроля их качества, устанавливается персональная зависимость оценки эффективности работы сотрудника от качества данных.

Под реализацией технических методов подразумевается внедрение и использование специализированного программного обеспечения.

#### **Опыт обеспечения качества данных в проектном направлении «Прорыв»**

АО «Прорыв» госкорпорации «Росатом» реализует проект «Прорыв», цель которого – «создание ядерно-энергетических комплексов, включающих в себя АЭС, производства по регенерации (переработке) и рефабрикации ядерного топлива...» [6]. Поскольку объекты, реализуемые в рамках проекта «Прорыв», рассчитаны на десятилетия эксплуатации, накопление точных и достоверных данных имеет высокий приоритет.

Рассмотрим, каким образом обеспечивается качество данных в проектном направлении «Прорыв» при эксплуатации информационных систем управления требованиями.

Для построения системы качества данных в проекте «Прорыв» была проведена серьезная работа по изучению нормативной документации. Организация работы по обеспечению качества данных в АО «Прорыв» построена с учетом требований нормативных документов, в частности, выполнена последовательность шагов, рекомендованная в «Своде знаний по управлению данными» [5]. Следует сразу обратить внимание, что, хотя шаги делались последовательно, было

проведено несколько итераций, в рамках которых выполнялись доработки и уточнения, прежде чем был достигнут результат, о котором рассказано ниже.

Первым шагом согласно [5] является определение данных высокого качества. На этом шаге в АО «Прорыв» был определен состав и требования к качеству данных, которые нужны для реализации поставленных бизнес-задач. В состав вошли как данные, непосредственно хранящиеся в информационных системах управления требованиями (далее- ИСУТ), так и данные, которыми ИСУТ обменивается с смежными системами – системой управления жизненным циклом и системой календарно-сетевого планирования.

На следующем шаге – **определение стратегии качества данных** – было решено организовать два этапа проверки качества данных:

- контроль качества данных перед загрузкой в ИСУТ;
- контроль качества данных после загрузки в ИСУТ.

Первый этап контроля выполняется с помощью специально разработанного инструмента – конвертора, используемого для загрузки данных в ИСУТ. Этот инструмент предотвращает загрузку в базу тех данных, которые не прошли проверку. Конвертор постоянно совершенствуется и развивается по мере появления новых требований к качеству данных. В итоге в существующей базе могут храниться данные, которые не проходили проверку всех последних требований. Кроме того, проверка качества отдельных частей данных и всей совокупности данных могут давать разные результаты, поэтому важно иметь второй этап контроля качества данных.

Второй этап выполняется над всей совокупностью данных, хранящихся в ИСУТ, при этом требования к качеству данных могут состоять из требований первого и второго этапов, так и содержать новые. Целью контроля данных после загрузки является повторная проверка всех данных (на последнюю версию требований первого этапа), а также их проверка на соответствие критериям согласованности, точности и полноты.

Следующий шаг связан с определением критически важных данных и бизнес-правил. Согласно рекомендации стандартов по обеспечению качества данных контролировать необходимо те данные, которые используются для принятия решений и интеграции с другими системами. В ходе анализа модели данных было установлено, какие классы объектов, хранящихся в ИСУТ, требуют пристального внимания, а также какие атрибуты этих классов должны быть обязательно заполнены. В связи с тем, что импорт данных в ИСУТ осуществляется порциями, проверку на полноту можно осуществлять только для этих порций данных. Поэтому на шаге определения критически важных данных и бизнес-правил определяется состав данных, которые должны быть обязательно загружены, а также

связи данных и их ограничения с учетом применяемой модели данных.

Следующий шаг — проведение первичной оценки качества данных. В ходе работ по первичной оценке отобранных на предыдущем шаге критически важных данных было выявлено, что в импортируемых файлах *Excel* встречаются разного рода ошибки. Первый тип ошибок трудно обнаружить при визуальной проверке данных, он не влияет на смысл информации, однако влияет на обработку данных информационной системой. К таким ошибкам относятся, например:

- два и более пробела между словами;
- использование в тексте различных пробельных символов (неразрывные пробелы, принудительный перенос строки, знаки табуляции);
- пустые строки;
- отсутствие пробела после запятой в списке организаций;
- различные непечатные символы, которые формируются при копировании или вставки текстов из текстовых редакторов в табличные;
- пробелы до начала и после окончания текста.

Второй тип ошибок, который встречается в файлах данных — это неверные данные или опечатки. Например, код документа сформирован не по шаблону, даты представлены в разных форматах, числовые значения имеют разные разделители разрядов, значения атрибутов взяты не из установленных справочников.

Третий тип ошибок, часто встречающийся в данных, — это данные, которые противоречат друг другу или данным, содержащимся в ИСУТ (внесённых в ИСУТ ранее).

Таким образом, для обеспечения консистентности и непротиворечивости данных необходимо учитывать регулярные изменения в смежных информационных системах или обновленных файлах импорта.

С учетом часто встречающихся ошибок и порядка загрузки данных в АО «Прорыв» разработаны сценарии проверок данных для каждого типа файлов импорта. Таких сценариев для обеспечения качества данных в ИСУТ в настоящее время пятнадцать: часть из указанных сценариев выполняются конвертором перед загрузкой в ИСУТ, а почти полный состав сценариев выполняется в специально разработанном модуле ИСУТ, который имеет функционал по разработке сценариев проверки качества данных и функционал по автоматизированному выполнению разработанных сценариев.

#### Инструменты по проверке качества данных

Как было отмечено, в проектом направлении «Прорыв» для реализации автоматизированной проверки качества данных в ИСУТ были разра-

ботаны два инструмента: конвертор данных и модуль проверки качества данных ИСУТ. Рассмотрим эти инструменты более подробно.

Конвертор предназначен для импорта данных из любых источников, включая созданных сотрудниками или подрядчиками вручную. Конвертор приводит внешние данные к модели данных, используемой в ИСУТ. В ходе трансформации данных происходит проверка их качества, а при необходимости и исправление. В частности, удаляются лишние пробелы и пустые строки, форматы чисел и дат приводятся к требуемому, выполняются и другие подобные операции, которые не изменяют смысл и значения данных.

Модуль ИСУТ по проверке качества данных предназначен для всесторонней проверки хранимых в системе данных. Особенностью модуля является возможность представлять требования в машиночитаемом и человекочитаемом виде, то есть для пользователя модуль отображает требования к качеству данных в человекочитаемом виде, а администратор данных имеет возможность создавать и редактировать оба способа представления требований.

Модуль по проверке качества данных выполняет проверку по команде пользователя. По окончании проверки модуль формирует отчет обо всех обнаруженных несоответствиях (ошибках) в данных с указанием исходного требования и описания ошибки, который можно скачать и использовать как навигатор для корректировки данных.

При разработке интерфейса модуля для ИСУТ был сделан акцент на простоте использования пользователями. Модуль не является самостоятельным программным обеспечением, он разработан под конкретную систему и может использоваться только с ИСУТ.

#### Заключение

Задачу обеспечения качества данных придется решать практически всем предприятиям, которые хотят сохранить конкурентоспособность и добиться успеха в новом экономическом укладе, называемым Индустрия 4.0. И задача эта не такая простая, как может показаться на первый взгляд. Специалисты АО «Прорыв» подошли к решению данной задачи системно и не ограничились только организационными или только техническими ее аспектами. В АО «Прорыв» в состав документов по управлению требованиями вошли разделы, в которых дано определение качества данных, представлен обзор нормативной документации, регламентирующий понятие «качество данных», его критерии и характеристики. В документах на информационную систему определен способ оценки качества данных, размещенных в ИСУТ, а по результатам применения был доработан конвертор и модуль ИСУТ по проверке качества данных.

Как результат всей этой деятельности — полное доверие руководства, сотрудников организации и смежников к данным, размещенным в системе. И как следствие — оценка результативности подразделения и проекта по отчетам, получаемым из ИСУТ.

#### Литература

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества».
2. ГОСТ Р 56215-2014/ISO/TS 8000-150:2011 «Качество данных. Основные данные. Структура

управления качеством. Data quality – Part 150: Master data: Quality management framework».

3. ISO/TS 8000 «Data quality».
4. ГОСТ Р 56214-2014/ISO/TS 8000-1: 2011 «Качество данных. Обзор».
5. DAMA-DMBOK. Свод знаний по управлению данными. Второе издание / Пер. с англ. Г.Агафонова. - Москва: Олимп-Бизнес, 2020.
6. О проекте – Проект Прорыв. [Электронный ресурс]. URL: <https://proryv2020.ru/o-proekte/> (дата обращения 14.09.2023).

## THE EXPERIENCE OF MACHINE-READABLE REQUIREMENTS APPLICATION IN PRORYV PROJECT

O. V. Zhdanova

"Proryv" Joint Stock Company, Moscow Russia

O. N. Stolyarov

"Atomenergoproekt" Joint Stock Company, Moscow Russia

*The article is devoted to the data quality assurance in Information systems. The concept of data quality is considered and an overview of Russian and International regulatory documents governing work with data is given. The experience of Proryv Project in implementing regulatory documents is described and the results of implementing a process to ensure data quality in the requirements management information system are presented.*

**Keywords:** requirements management system, data quality, data verification, automated data verification, data management, data quality regulations.

---

**Жданова Оксана Валерьевна**, начальник отдела развития информационной модели и системы управления требованиями ЗЯТЦ.

E-mail: [zhdov@proryv2020.ru](mailto:zhdov@proryv2020.ru)

**Столяров Олег Николаевич**, начальник управления научно-технологического обеспечения проектирования АЭС.

E-mail: [Stolyarov\\_ON@aep.ru](mailto:Stolyarov_ON@aep.ru)

*Статья поступила в редакцию 11 сентября 2023 г.*

Информационные технологии в проектировании и производстве: Науч.-техн. журнал /  
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2023. № 3 (191). С. 1—52.

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 19.09.2023.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,2.  
Заказ 2023. 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.