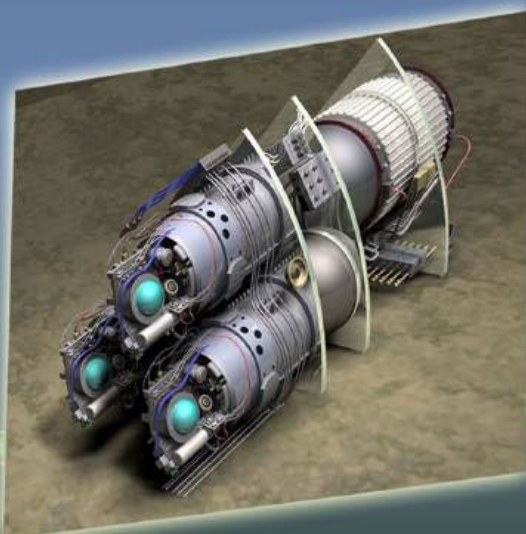
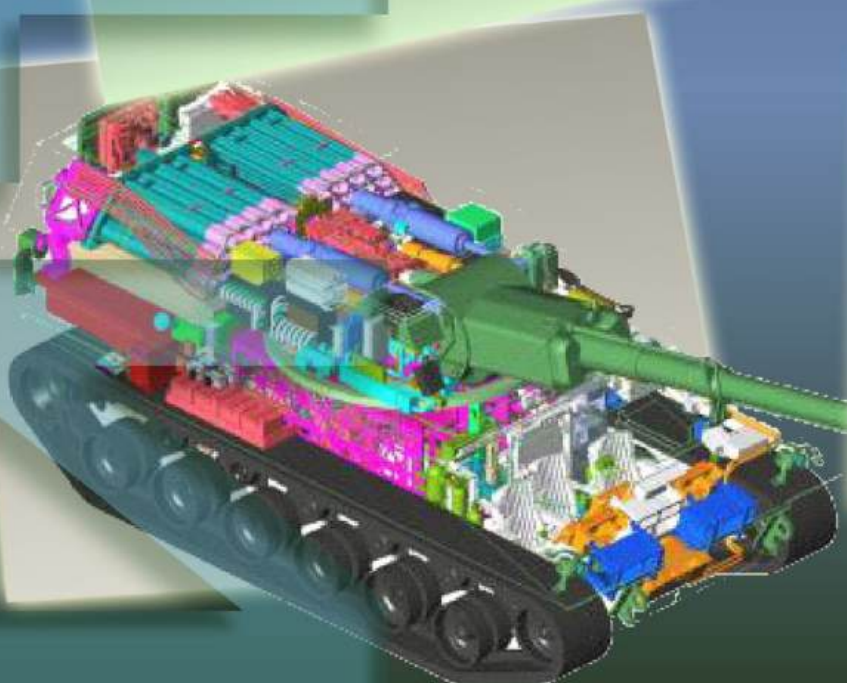
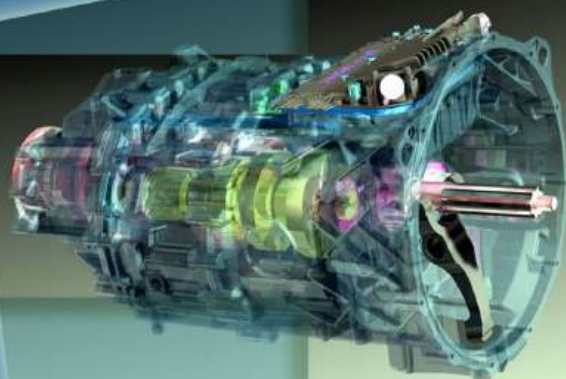
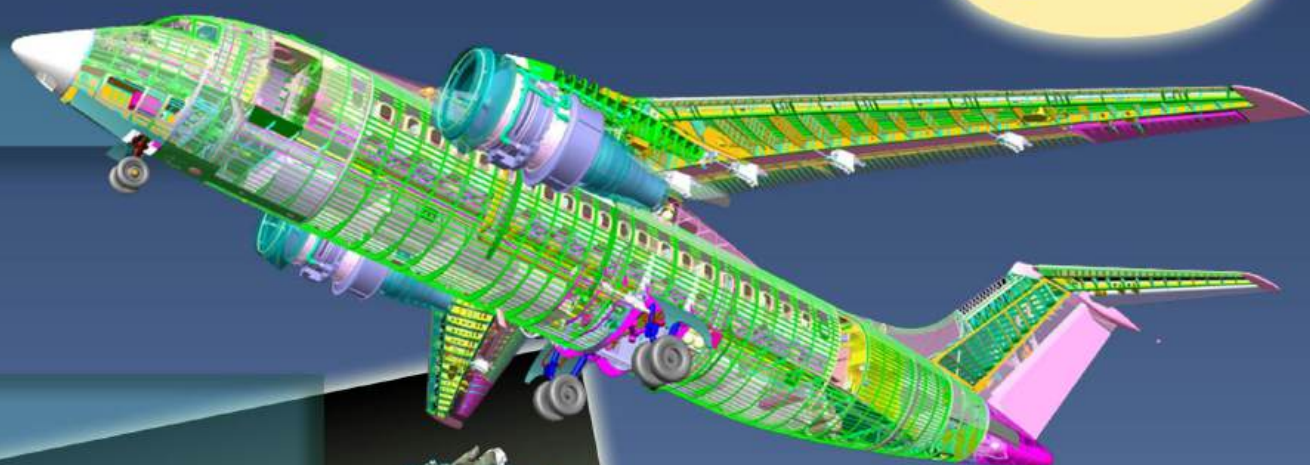


# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 1' 2020





## 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 образования и науки 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: [secretariat@ntkompas.ru](mailto:secretariat@ntkompas.ru)



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

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

## № 1 (177) 2020

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1976 г.

### Главный редактор

И. А. Шеремет, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, 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

Г. П. Глотова, ФГУП «НТИЦ 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 «НИИИА»; 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. Соколин, канд. воен. наук, ФГУП «НТИЦ оборонного комплекса «Компас»; А. П. Солнцев, д-р воен. наук, проф., ФГУП «НТИЦ 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

☎ редакции (495) 491-43-17  
E-mail: izdanie@ntckompas.ru  
http://ntckompas.ru

### Информационные технологии

в проектировании и производстве:

Науч.-техн. журн./ФГУП «НТИЦ оборонного комплекса «Компас», 2020.  
№ 1 (177). С. 1—64.

Редактор О. А. Константинова  
Компьютерная верстка: Н. В. Ильина,  
К. В. Трыкина

Подписано в печать 15.02.2020.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 7,4. Уч.-изд. л. 7,7.  
Заказ 1943. Тираж 250 экз.  
Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., 77, ФГУП «НТИЦ оборонного комплекса «Компас».  
Отпечатано в ООО «Рапидограф».  
117342, Москва, ул. Бултерова, д. 17Б.  
Индекс 79378. 9 статей.

Статьи рецензируются.

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### Инновационные технологии решения задач проектирования, моделирования и производства

- Сумароков С. В., Гусев М. В., Кечков А. А., Новосельский Ф. О. Концепция и реализация макета системы управления данными и процессами расчетных и экспериментальных научных исследований ..... 3
- Бутко А. О. Особенности применения программных средств в рамках процессов комплексного проектирования ..... 8
- Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Применение визуальных инструментов BPMN для моделирования технологической подготовки производства (Обзор) ..... 14
- Правильщиков П. А. Квантовая революция в вычислительной технике и новые модели вычислений ..... 27
- Прудников В. А. SADT-технология в построении IDEF-диаграмм в формировании структурной композиции информационных систем ..... 36

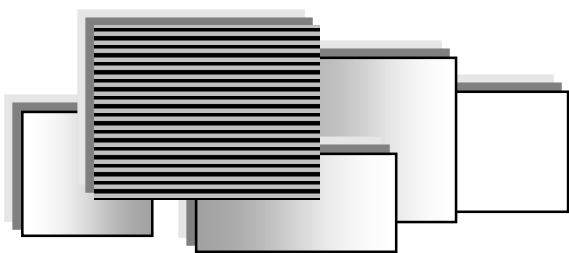
### Информационные технологии решения задач производства

- Овечкин М. В. Экспериментальные исследования адекватности распознавания рентгенограмм методами искусственных нейронных сетей ..... 48
- Сергеев А. И., Сердюк А. И., Щеголев А. В. UML-диаграмма классов программы расчета вытяжного инструмента цилиндрических изделий ..... 53
- Катаев М. Ю., Хотненко С. Ю. Анализ бизнес-процессов логистической структуры движения газонефтедобывающего предприятия ..... 57
- Полянский В. И. Выбор показателей результатов принятия решений при оценивании риска в процессе создания и эксплуатации автоматизированной системы управления ..... 61

# **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.



## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 004.4

### КОНЦЕПЦИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ МАКЕТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ И ПРОЦЕССАМИ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С. В. Сумароков; М. В. Гусев; А. А. Кечков; Ф. О. Новосельский, канд. эконом. наук  
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

*Представлено описание концепции системы управления данными и процессами расчетных и экспериментальных научных исследований, разрабатываемой в рамках проектного направления "Прорыв" [1] для предприятий атомной отрасли. Приведены результаты разработки и проведения испытаний макета данной системы.*

**Ключевые слова:** система "УРАНИЯ", разработка изделий и объектов, требования, расчетные исследования, экспериментальные исследования, автоматизация, макет системы "УРАНИЯ".

Одними из направлений обеспечения соответствия требований и реальных характеристик промышленных энергокомплексов (ПЭК), разрабатываемых в рамках реализуемого в Госкорпорации "Росатом" проектного направления "Прорыв" (ПН "Прорыв"), являются эффективное планирование и управление расчетными и экспериментальными исследованиями. Эти исследования должны проводиться для поиска оптимальных технологических, конструкторских и проектных решений, а также для обоснования эксплуатационных характеристик ПЭК и их элементов, обоснования их безопасности.

Такой подход предполагает планирование и отслеживание взаимосвязей между требованиями к технологиям и установкам, исходной для исследований документацией (проектной, конструкторской, технологической), расчетными системами для проведения исследований, экспериментальными установками, результатами расчетных и экспериментальных исследований и решениями, принятыми на основании проведенных исследований. Для эффективного управления необходимо иметь доступ ко всему массиву расчетных и экспериментальных данных, полученных в результате исследований. Также в силу большого количества обрабатываемой информации и применяемых расчетных систем требуется максимально упростить и автоматизировать рутинные процессы подготовки исходных данных, запуска расчетов (в том чис-

ле связанных расчетов и расчетов на суперкомпьютерах) и интерпретации результатов.

Для реализации эффективного планирования и управления расчетными и экспериментальными исследованиями необходимо разработать и внедрить специализированную автоматизированную систему, которая не должна иметь зарубежных коммерческих программных компонентов (в силу необходимости минимизации рисков и гарантированной возможности применения системы) и использовать при этом опыт, накопленный в части управления расчетными и экспериментальными научными исследованиями в ПН "Прорыв".

#### Назначение системы "УРАНИЯ"

В соответствии с утвержденным техническим заданием разрабатываемая система управления данными и процессами расчетных и экспериментальных научных исследований "УРАНИЯ" должна быть предназначена для:

- автоматизации управления расчетными и экспериментальными данными (сбор, структурирование, централизованное и защищенное хранение или интеграция с существующими хранилищами, поиск);
- предоставления унифицированных механизмов для проведения расчетов с использованием различных расчетных систем (в том числе

собственной разработки) и вычислительных ресурсов различного уровня;

- автоматизации, организации и регламентации совместной работы всех участников (в том числе территориально удаленных друг от друга) процессов проведения расчетных и экспериментальных исследований;
- накопления и сохранения научного и инженерного опыта и знаний;
- поддержки нового передового подхода к разработке технологий и установок ПЭК.

Входной точкой для системы является появление потребности в выполнении каких-либо комплексных расчетных или экспериментальных исследований по выбранной дисциплине и сценарию использования технологий и установок.

В качестве исходных данных для сопровождения расчетных исследований должны выступать "эскизная" инженерная модель, набор требований и применяемые расчетные системы. По результатам работы в системе должна формироваться расчетная модель, соответствующая требованиям, либо должен фиксироваться факт отсутствия приемлемого решения. Таким образом, система "УРАНИЯ" сопровождает весь процесс проведения расчетного исследования, включая появление новых расчетных моделей и их проверку на соответствие требованиям.

В случае сопровождения экспериментальных исследований система "УРАНИЯ" должна функционировать в соответствии с определенными регламентами. Входной точкой являются требования к эксперименту, выходной — результаты экспериментального исследования с

оценкой соответствия проверяемого варианта технического решения требованиям к изделию/объекту.

Помимо этого система "УРАНИЯ" выполняет накопление и осуществление доступа к инженерным знаниям, позволяя найти необходимые данные, а также сформировать новые расчетные и экспериментальные проекты по опыту (шаблону) уже выполненных.

### Современный подход к разработке изделий и объектов

Система "УРАНИЯ" должна поддерживать современный подход к разработке сложных наукоемких изделий и объектов, схематично показанный на рисунке 1, при котором во главу угла ставится гарантированное обеспечение соблюдения предъявляемых к изделию/объекту требований. Для реализации данного подхода (в том числе описанного в публикациях [2, 3]) в первую очередь необходимо сформировать весь набор требований (начиная с потребительских характеристик изделия — требований верхнего уровня и заканчивая атомарными требованиями к отдельным элементам изделия/объекта и их функционированию). Каждое требование должно быть конкретным и однозначно моделируемым с использованием соответствующих расчетных систем. Таким образом, процесс поиска и оптимизации конструкторских, технологических и проектных решений во многом сводится к оценке различных вариантов решений на предмет удовлетворения предъявленным требованиям.

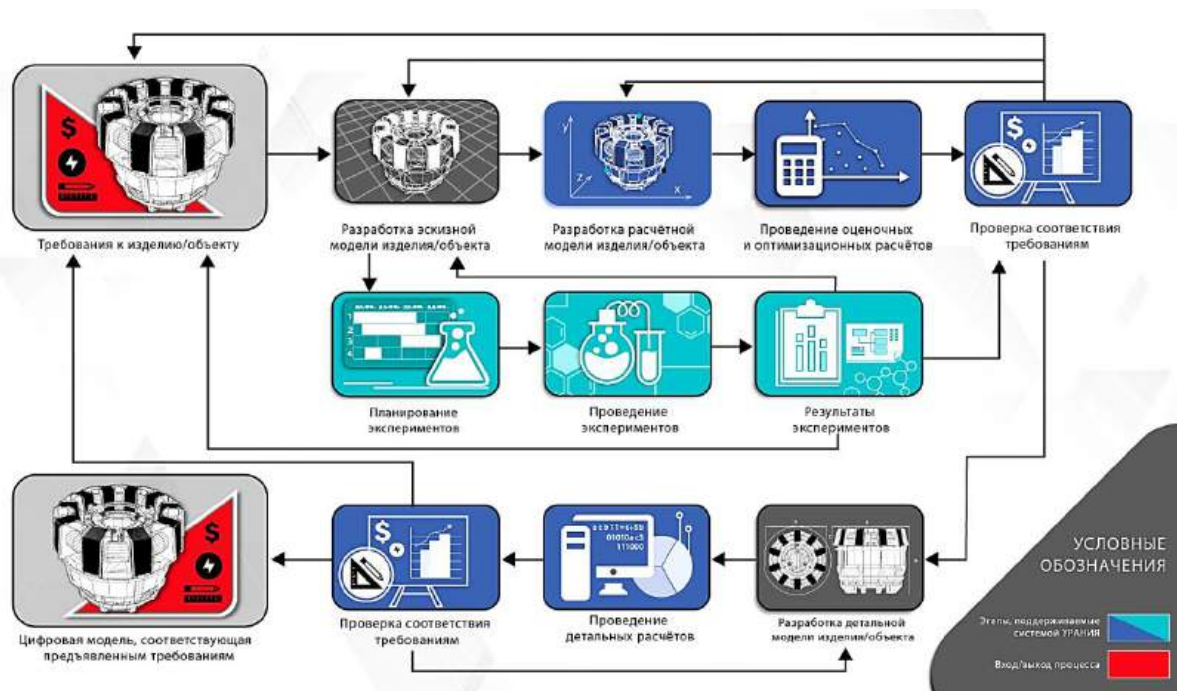


Рис. 1. Концептуальная схема современного процесса проектирования изделий и объектов, которая должна поддерживаться системой "УРАНИЯ"

Множество проверок различных вариантов решений формируется исходя из дисциплин (прочность, нейтроника, теплогидравлика, связанные расчеты и т. п.), а также из различных сценариев нормальной эксплуатации изделия/объекта и нарушений нормальной эксплуатации и требований по обеспечению безопасности (в частности, сценариев "тяжелых аварий").

Исходными данными для оценки вариантов являются "эскизная" конструкторская, технологическая или проектная модель. Далее на основе данной модели для каждого расчетного сценария строится упрощенная расчетная модель для вычислений соответствующим расчетным кодом или набором кодов. Результаты расчета позволяют сформировать значения искомых параметров и сравнить их с требуемыми значениями. Если все требования удовлетворить не удастся, то расчетная модель корректируется и расчеты проводятся заново до тех пор, пока не будет найдено удовлетворяющее требованиям техническое решение (или не будет принято решение о прекращении проработки данной "ветки"). Возможен также вариант, когда необходима корректировка требований.

После того как техническое решение найдено, оно должно быть детально проработано. После детализации полученное решение проходит окончательную проверку посредством выполнения соответствующих расчетов и контроля полученных значений на соответствие требованиям.

Таким образом, в течение цикла разработки изделия/объекта могут выполняться как первичные и оптимизационные расчеты предполагаемых технических решений, так и проверочные расчеты. Примером оптимизационных расчетов являются работы по оптимизации конструкции реакторной установки: конструкторы предлагают более оптимальные конструктивные решения, для которых в дальнейшем нужно проверить соблюдение функциональных требований и требований безопасности и при необхо-

димости провести серию итераций по корректировке предложенной конструкции.

Роль экспериментов в данной методологии проектирования состоит в формировании знаний о поведении изделия/объекта, его элементов или прототипов в тех или иных условиях, а также знаний для верификации расчетных кодов, оценки и расширения их области применимости. На основе экспериментальных данных проверяется и выполнимость предъявляемых к изделию требований. Таким образом, экспериментальные данные наряду с результатами расчетов также встраиваются в описанную методологию.

### Функции и пользователи системы "УРАНИЯ"

На рис. 2 схематично показаны функциональные подсистемы системы "УРАНИЯ", которые должны обеспечивать следующие возможности:

- отслеживание требований и исходной документации на технологии и установки (в том числе за счет интеграции с внешними системами — системами управления требованиями (СУТ) и системой управления жизненным циклом (PLM));
- управление расчетными и экспериментальными данными;
- управление бизнес-процессами проведения расчетных и экспериментальных исследований;
- планирование проведения испытаний (расчетных и экспериментальных);
- подключение различных расчетных систем (расчетных кодов и пре/постпроцессоров), а также интеграцию с внешними расчетными системами и платформами;
- запуск и управление вычислениями;
- обработку и визуализацию результатов расчетов.



Рис. 2. Функциональные подсистемы системы "УРАНИЯ"

Система "УРАНИЯ" должна быть использована:

- технологами, конструкторами, проектантами и расчетчиками, выполняющими расчетные исследования в рамках обоснования различных технических решений;
- специалистами, задействованными в проведении экспериментальных работ;
- сотрудниками "проектной группы", осуществляющими общее управление и контроль за НИОКР по разработке изделий и объектов ядерного топливного цикла, отслеживающими выполнение предъявляемых к ним требований и планирующими проведение необходимых расчетных и экспериментальных исследований.

#### Потенциальные эффекты от системы "УРАНИЯ"

Потенциальными эффектами от создания и внедрения системы "УРАНИЯ" являются:

- снижение рисков недостижения результатов НИОКР за счет планирования всех расчетов и экспериментов, необходимых для обоснования требований к результатам НИОКР;
- сокращение сроков на подготовку и проведение расчетных исследований за счет автоматизации различных действий и бизнес-процессов проведения расчетов;
- сокращение времени на поиск результатов расчетных и экспериментальных исследований, а также исходных данных, данных о примененных расчетных системах и установках, связанных требованиях;
- сокращение трудозатрат на освоение новых расчетных систем и вычислительных ресурсов за счет унификации средств управления вычислениями и расчетными данными.

В результате внедрения системы "УРАНИЯ" в любой момент времени можно будет получить ответы на следующие вопросы:

- какие расчеты и эксперименты запланированы и/или выполнены для подтверждения выполнения тех или иных требований;
- какие результаты расчета соответствуют конкретным версиям исходных данных (технологической, конструкторской и проектной документации);
- с помощью каких расчетных кодов и математических моделей выполнены те или иные расчеты;
- кем и когда получены расчетные и экспериментальные данные;
- на какой стадии находится процесс проведения расчетного или экспериментального исследования.

#### Разработка и испытание макета системы "УРАНИЯ"

Для подтверждения правильности принятых технических решений по реализации системы "УРАНИЯ" и ее возможной эффективности в

2019 г. реализован макет системы "УРАНИЯ" (далее макет) и проведены его испытания.

В качестве варианта реализации макета и полнофункциональной версии системы "УРАНИЯ" сделан и обоснован выбор в пользу использования программной платформы SPDM-система комплекса "Виртуальный полигон" [4], разработанной группой компаний CompMechLab. Данная платформа имеет базовый функционал, соответствующий требованиям на систему "УРАНИЯ". Однако в дальнейшем потребуются значительная доработка и развитие функционала выбранной платформы для реализации всех требований.

В рамках реализации макета в соответствии с разработанным эскизным проектом:

- выполнено развертывание макета на ресурсах ИБРАЭ РАН;
- определена информационная модель хранения данных в макете;
- подключены необходимые вычислительные ресурсы (в том числе реализована интеграция с системой управления вычислительными очередями TORQUE);
- подключены специализированные расчетные коды (решатели) СОКРАТ-БН/В2 и ЕВКЛИД/V1, используемые в ПН "Прорыв" [5];
- для кодов СОКРАТ-БН/В2 и ЕВКЛИД/V1 реализован постпроцессинг;
- настроены группы и роли пользователей.

Кроме того, в рамках реализации макета решена демонстрационная задача по оптимизации конструкции условной опоры. Решение данной задачи позволило продемонстрировать возможности макета по информационной и технологической поддержке проведения множества итерационных расчетов различных вариантов моделей с функциями наглядного прослеживания истории и анализа соответствия результатов расчетов указанным требованиям.

Испытания макета проводили сотрудники АО "ОКБМ Африкантов" в соответствии с разработанной программой и методикой проведения испытаний и рабочей инструкцией пользователя макета. Испытания проводили путем выполнения расчетов кодами СОКРАТ-БН/В2 и ЕВКЛИД/V1, подключенными к макету. Тестовые задачи представляли собой расчеты номинальных параметров тепловыделяющих сборок (ТВС) реактора БН-1200.

Процессы выполнения расчетов кодами СОКРАТ-БН/В2 и ЕВКЛИД/V1 имели следующие этапы:

- создание и организацию структуры данных для проведения расчетных обоснований и хранения результатов;
- наполнение проекта требованиями к технологиям, установкам и их компонентам, для которых необходимо провести расчетные обоснования;
- планирование и выдачу заданий по проведению расчетов с указанием соответствующих требований;



- загрузку необходимых исходных данных и моделей;

- проведение вычислений с использованием требуемых подключенных расчетных кодов и автоматизированных механизмов;

- анализ полученных результатов вычислений, оценка их соответствия исходным требованиям.

В результате испытаний макета подтверждены следующие функциональные возможности:

- ввод и хранение различных типов расчетных данных и их параметров для обеспечения полноты информации;

- взаимосвязанное хранение следующих данных по расчетным исследованиям:

- требований к технологиям и установкам;
- исходных данных;
- расчетных данных (входных данных, результатов вычислений, обработанных результатов);
- информации об используемых расчетных системах;

- сравнение результатов расчетов с заданными требованиями;

- выполнение поисковых запросов требуемых расчетных данных;

- разграничение доступа ко всем данным в макете правами доступа с использованием ролевых политик;

- запуск вычислений разными расчетными системами и на разных вычислительных ресурсах с помощью единого интерфейса пользователя.

Испытания макета системы "УРАНИЯ" подтвердили эффективность уже реализованных функциональных возможностей и корректность технических решений, принятых при реализации макета. Также по итогам испытаний сформулированы предложения по развитию технических и функциональных характеристик, которые должны быть учтены в ходе реализации полнофункциональной версии системы "УРАНИЯ".

## Заключение

Современные реалии и развитая конкуренция во всех отраслях промышленности требуют повышения эффективности и получения максимальной отдачи от используемых ресурсов. Представленная система "УРАНИЯ" нацелена на управление одними из наиболее наукоемких и требующих высокой компетенции процессов — процессами расчетных и экспериментальных исследований. Управление данными исследованиями укладывается в общую концепцию "цифровизации" производственных процессов и реализации цифрового двойника изделий и объектов.

Планируется начать разработку полнофункциональной версии системы "УРАНИЯ". Ежегодно должны выпускаться релизы системы, включающие новый функционал разработанных подсистем. Каждый релиз должен проходить испытание на предприятиях с последующим внедрением в постоянную эксплуатацию.

## Литература

1. Федеральная целевая программа "Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года", утвержденная постановлением Правительства РФ 03.02.2010 г. № 50.

2. Боровков А. И., Марусева В. М., Рябов Ю. А. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения: доклад "Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии". Март 2018. С. 24—43.

3. Боровков А. И., Марусева В. М., Рябов Ю. А. Умные цифровые двойники — основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Трамплин к успеху. 2018. № 13. С. 12—16.

4. Описание цифровой платформы CML-Bench [Электронный ресурс]. URL: <http://fea.ru/article/cml-bench>

5. Большов Л. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф., Шмидт О. В. Расчетные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 6. С. 132—137.

## THE CONCEPT AND IMPLEMENTATION OF THE MOCK-UP OF THE SIMULATION AND EXPERIMENT PROCESS AND DATA MANAGEMENT SYSTEM

S. V. Sumarokov, M. V. Gusev, A. A. Kechkov, F. O. Novoselsky  
Nuclear Safety Institute of the RAS, Moscow, Russia

*The article provides the description of concept of simulation and experiment process and data management system for simulation and experimental scientific research, which is being developed as part of the Breakthrough project for nuclear industry enterprises. The results of the development and testing of the mock-up of this system are presented.*

**Keywords:** URANIA, development of products and objects, requirements, computational research, experimental studies, automation, mock-up.

Сумароков Сергей Вячеславович, заведующий отделом.

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

Гусев Михаил Владимирович, главный специалист.

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

Кечков Алексей Александрович, ведущий инженер.

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

Новосельский Филипп Олегович, заместитель заведующего отделом.

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

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2019 г.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ В РАМКАХ ПРОЦЕССОВ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А. О. Бутко, канд. техн. наук

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

*Предложены набор программных средств и методика для комплексного автоматизированного моделирования и планирования, позволяющих построить в рамках предприятия единую среду проектирования и систему подготовки производства на базе создаваемых электронных конструкторско-технологических решений. В основу системы положена информационная модель, разрабатываемая в инвариантной лингвистической среде моделирования. Решение может быть использовано в любой задаче, которая требует моделирования и оптимизации процессов подготовки производства технических изделий.*

**Ключевые слова:** управление проектами, автоматизация, программирование, технологические процессы, нормирование, преобразование данных, моделирование, структурное моделирование, параметрическое моделирование.

Для предприятия все более актуальным становится использование комплексных программных продуктов, объединяющих функции различных проектирующих и иных систем в одном решении. Программное обеспечение такого уровня представляют интегрированные комплексы (ИК). В нашей стране обучается достаточное количество специалистов по системам автоматизированного проектирования (САПР), но большинство из них изучает отдельные системы, например технологического проектирования, и лишь немногие — сложные полнофункциональные программные продукты уровня PLM. Со временем нехватка опытных работников, способных успешно настраивать и эксплуатировать ИК, приведет к необходимости нанимать иностранных консультантов. Поэтому подробное изучение современных комплексных автоматизированных систем (АС) в рамках соответствующих дисциплин видится актуальной задачей отечественной системы образования.

В рамках проводимых научно-исследовательских работ проектировщики используют комплекс программных продуктов, составляющих систему, позволяющую выполнять анализ технико-экономических характеристик и предварительное планирование производства изделий различного назначения. Система включает две основные компоненты: структурно-параметрический моделлер (программно-методический комплекс структурно-параметрического моделирования — ПМК СПМ), позволяющий создавать достаточно крупные конструкторско-технологические модели сложных технических изделий [1], и пакет управления проектами Microsoft Project, используемый для оценки экономических и ресурсных характеристик производственных процессов и планирования. Для совместной работы этих программных продуктов применяется разработанный сотрудниками МАИ модуль интерфейса SPMtoMSP, реализующий функции обмена данными между ПМК

СПМ и Microsoft Project. В свою очередь, ПМК СПМ включает следующие компоненты.

*Основные модули:*

- программный модуль монитора ПМК СПМ;
- трансляции модели — формирование СПБ;

- структурной обработки модели;
- параметрической обработки;
- геометрической обработки модели;
- визуализации модели.

*Дополнительные модули:*

- технологического моделирования;
- корректировки параметров СПМ.

Для анализа параметров модели (характеристик изделия) используют модуль управления анализом и имитационного моделирования (ACSM), работающий в комплексе с ПМК СПМ и позволяющий представлять результаты расчетов или изменения характеристик в виде графиков и диаграмм.

В процессе выполнения работы комплексом ПО решаются следующие задачи:

- моделирование конструкции изделия;
- моделирование технологических процессов с нормированием;
- построение комплексной параметризованной модели;
- проведение технических расчетов;
- формирование проектов в Microsoft Project для разных конфигураций модели;
- оценка исследуемых характеристик изделия;
- представление результатов в виде графиков.

Первые три задачи решаются в среде СПМ на основе существующих исходных данных в виде чертежей, спецификаций, маршрутных и операционных карт, технологических процессов [2], инженерных расчетов. Параметризация может выполняться в нескольких вариантах:

изменение геометрии, а соответственно, и технологических процессов, расчет различных характеристик, не связанных с геометрией. При описании модели учитываются особенности подготовки данных для последующей передачи в Microsoft Project [3]. Результатом работы на этом этапе являются визуальная репрезентация модели и ее структуры, а также карты технологических процессов, полученные с помощью моделиера Pt\_tech в формате Microsoft Word (рис. 1). Таким образом, конечная СПМ будет включать спецификацию на изделие, геометрическое представление деталей, расчеты и технологические процессы.

В ходе моделирования технологии возможно проведение нормирования по стандартным таблицам. Так как требуемый функционал необходимо обеспечивать в комплексе с разными приложениями, модуль расчета трудоемкости/нормирования реализован в виде стандартной библиотеки (TPNORM), созданной в среде разра-

ботки программного обеспечения Microsoft Visual Studio.

Модуль позволяет решать следующие задачи:

- расчет значений трудоемкости перехода/операции по заданным параметрам элементарно-обрабатываемых поверхностей (ЭОП) (извлекаются из базы, поддерживаемой средствами Microsoft SQL Server или Oracle);
- формирование технологического решения на базе структурно-параметрической модели с помощью программно-методического комплекса структурно-параметрического моделирования (ПМК СПМ);
- запись результатов расчета и/или элементов решения в технологическую базу данных.

Библиотека работает с приложениями TPEDIT (база в Microsoft SQL Server), редактор СПМ (база в СПМ), СПТД [4] (база в Oracle) (рис. 2).

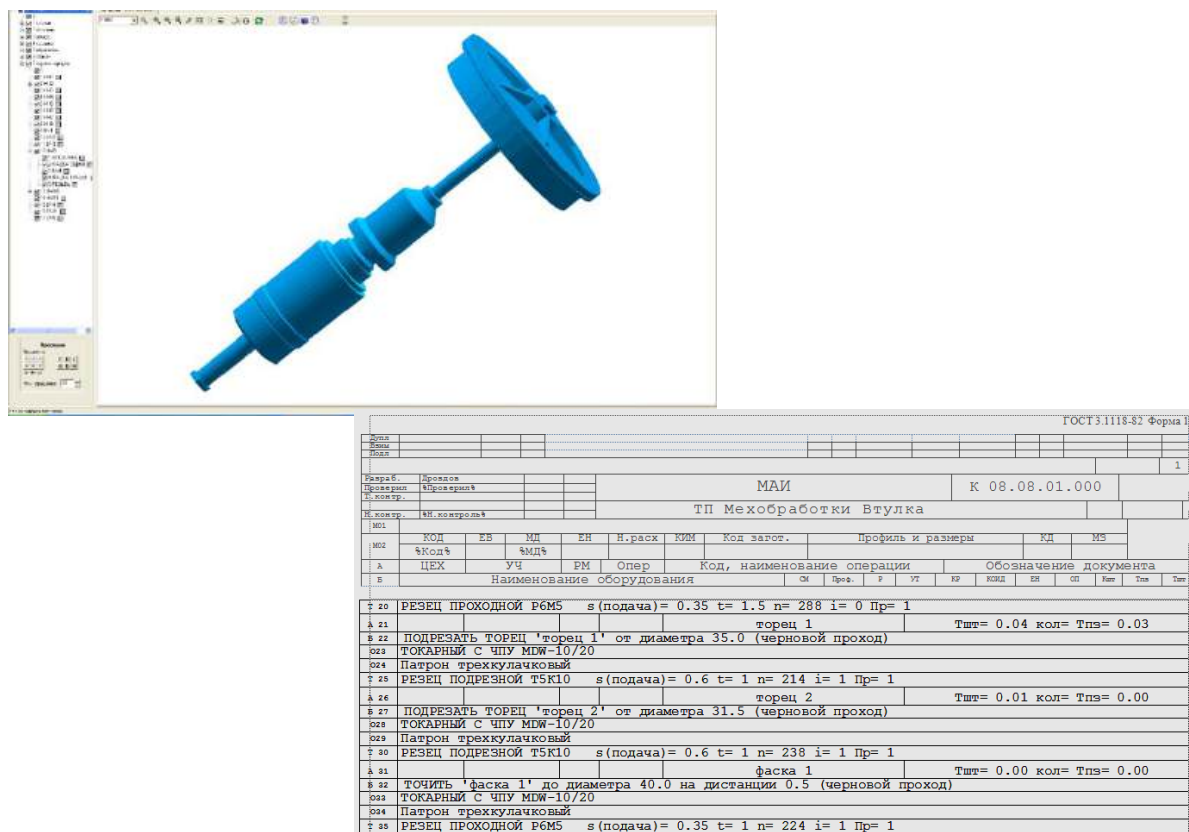


Рис. 1. Результаты моделирования

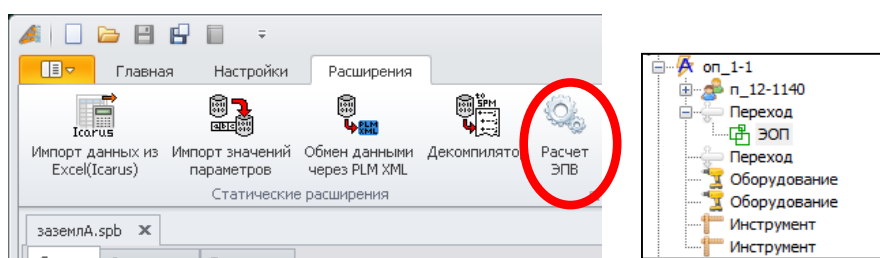


Рис. 2. Подключение модуля к редактору СПМ и фрагмент структуры решения

Алгоритм генерации решения реализуется процедурами ПМК СПМ путем передачи в модель параметров ЭПВ с последующей обработкой и возвратом результатов в соответствующие поля базы данных. Технологическая модель изделия может быть предварительно обработана трансляторами СПМ. Для расчета перехода необходима установка типовых параметров для ЭОП, связанных с переходом.

При расчете трудоемкости используют специальные СПМ, в которые введены данные по нормативам и составу работ. Эти модели позволяют осуществлять выборку необходимых элементов решения при структурном проектировании. Для обеспечения требуемого порядка расчета взяты реальные нормативы, применяемые в ГКНПЦ им. М. В. Хруничева. Все таблицы переводят в электронный вид и форматируют для использования в среде СПМ (рис. 3).

Обращение к таблицам выполняют из раздела элементов посредством указания имени, входных и выходных параметров и свойств.

Выборку данных из таблиц с нормами осуществляют с помощью параметров и свойств, определяющих расположение необходимого значения (рис. 4).

Помимо таблиц в модели хранится описание переходов, используемое при формировании

элементов решения, которое в итоге передается в базу системы управления технологическими знаниями.

На следующем этапе можно реализовать различные технические расчеты, которые могут быть интегрированы в структурно-параметрическую модель.

В качестве иллюстрации выбрана разработанная модель системы заправки (СЗ) ракет космического назначения (РКН). Модель воспроизводит основные геометрические и структурные характеристики СЗ РКН. В нее интегрирован гидравлический расчет процесса заполнения рабочей емкости, резервной емкости и емкости хранения компонентов топлива из различных средств доставки. В модели реализована существующая методика, которая позволяет получать значения основных геометрических характеристик емкостей СЗ и ряда основных функциональных параметров: геометрический объем емкости, время заполнения емкостей в различных режимах, производительность системы заполнения емкостей, изменение давления в емкостях, необходимое количество средств доставки (железнодорожных или автоцистерн) для одновременного заполнения емкостей системы.

На рис. 5 показаны модель емкости и фрагмент расчета в СПМ.

Длина мм, до:	Наружный диаметр трубы мм, до:																				
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
	Толщина стенки трубы мм, до:																				
	1.0										1.5										
Штучное время для I-го исполнителя.																					
120			3.3		3.5	3.7	3.8	4.0	4.2	4.4					3.7	3.9	4.2	4.3	4.5	4.8	5.1
200	3.1	3.2		3.4			3.8	4.1	4.3	4.5	3.1	3.3	3.5		3.8	4.0	4.3	4.4	4.6		5.2
250					3.5	3.8					4.6	3.2	3.4	3.6			4.4	4.5	4.7	5.1	
300							4.8								3.9	4.1				5.2	5.3
500	3.2	3.3	3.5		3.7	3.9	4.1	4.2	4.4	4.7	3.3	3.5	3.7	4.0	4.1	4.5	4.6	4.8	5.2	5.4	
700	3.3				3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	5.0	3.4	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6	4.8		5.5	5.8	
1000	3.4	3.5	3.7		3.9	4.1	4.3	4.5	4.8	5.1	3.5	3.7	3.9	4.2	4.4	4.7	5.0	5.6	5.7		
1300	3.7	3.8	4.0	4.2	4.5	4.6	4.8	5.2	5.5	5.8	4.0	4.2	4.5	4.7	5.0	5.4	5.6	6.1	6.2		
1500	3.8	3.9	4.2	4.3	4.7	4.7	5.1	5.4	5.7		3.9	4.3	4.6	4.9	5.4	5.5		6.2	6.3		
2000	4.0	4.2	4.4	4.7	5.0	5.3	5.5	5.8	6.0		4.1	4.4	4.6	5.1	5.5	5.8	6.0	6.4	6.5		
2500	4.1	4.3	4.6	4.7	5.2	5.4	5.8	6.0	6.4	4.2	4.5	4.7	5.2	5.5	5.8	6.0	6.4	6.8	7.1		
3000	4.2	4.4	4.8	4.9	5.3	5.5	5.8	6.2	6.5	4.3	4.6	5.0	5.3	5.7	6.0	6.2	6.5	7.2	7.3		
4000	4.4	4.7	5.0	5.4	5.8	6.0	6.3	6.6	6.9	4.3	4.6	5.0	5.3	5.7	6.1	6.2	6.6	7.4	7.5		
5000	4.5	4.7	5.2	5.5	5.9	6.1	6.4	6.8	7.2	4.7	5.1	5.4	5.8	6.2	6.6	6.8	7.2	8.0	8.3		
6000	4.7	5.1	5.7	5.8	6.3	6.5	6.8	7.3	8.2	5.0	5.3	5.6	6.2	6.5	7.0	7.3	7.8	8.7	9.0		
7000	5.3	5.5	6.1	6.3	7.2	7.5	8.2	8.6	9.0	5.5	5.9	6.5	7.0	7.5	7.9	8.0	9.3	10.0	10.2		

отреза.срт - Блокнот

Файл Правка Формат Вставка

ТАБЛИЦА: Имя=tab01; Столбец=00:10:	
Шапка: Длина: d10: d20: d30: d40: d50: d60: d70:	
СТРОКА=120	3.1 3.2 3.3 3.5 3.7 3.9 4.2 4.3 4.5 4.8 5.1
СТРОКА=200	3.1 3.2 3.4 3.5 3.8 4.0 4.3 4.4 4.6 4.9 5.2
СТРОКА=250	3.1 3.2 3.4 3.5 3.8 4.0 4.3 4.4 4.6 4.9 5.2
СТРОКА=300	3.2 3.3 3.5 3.7 3.9 4.2 4.3 4.5 4.7 5.1 5.4
СТРОКА=500	3.2 3.3 3.5 3.7 3.9 4.2 4.3 4.5 4.7 5.1 5.4
СТРОКА=700	3.3 3.4 3.5 3.7 3.9 4.2 4.3 4.5 4.7 5.1 5.4
СТРОКА=1000	3.4 3.5 3.7 3.9 4.2 4.3 4.5 4.7 5.1 5.4 5.8
СТРОКА=1300	3.7 3.8 4.0 4.2 4.4 4.6 4.8 5.0 5.2 5.5 5.8
СТРОКА=1500	3.8 3.9 4.2 4.3 4.7 4.7 5.1 5.4 5.7 6.0 6.3
СТРОКА=2000	4.1 4.3 4.6 4.7 5.2 5.4 5.8 6.0 6.4 6.8 7.1
СТРОКА=2500	4.2 4.3 4.8 4.9 5.3 5.5 5.8 6.2 6.5 6.9 7.3
СТРОКА=3000	4.2 4.4 4.9 5.1 5.5 5.8 6.2 6.5 6.9 7.3 7.7
СТРОКА=4000	4.4 4.7 5.0 5.4 5.8 6.0 6.4 6.8 7.2 7.6 8.0
СТРОКА=5000	4.5 4.7 5.2 5.5 5.9 6.1 6.4 6.8 7.2 7.6 8.0
СТРОКА=6000	4.7 5.1 5.7 5.8 6.3 6.5 6.8 7.3 7.8 8.2 8.6
СТРОКА=7000	5.3 5.5 6.1 6.3 7.2 7.5 8.2 8.6 9.0 9.5 10.0

Длина мм, до:	Штучное время для II-го исполнителя.									
	1.5	1.8	1.9	2.1	2.3	2.4	2.5	2.8	3.4	4.0
3000	1.5	1.8	1.9	2.1	2.3	2.4	2.5	2.8	3.4	4.0
4000	1.5	1.8	1.9	2.1	2.3	2.4	2.5	2.8	3.4	4.0
5000	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.7	2.8	3.1	3.8	4.4
6000	1.9	2.1	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	3.2	4.0	4.7
7000	2.1	2.3	2.6	2.8	3.2	3.4	3.7	4.0	4.5	5.3

Рис. 3. Преобразование исходных данных

```

ЭЛЕМЕНТ=t510; КОД=tab; ИМЯТАБЛ='tab5'; ВХОДИД='Длин'; ВХОД=Дл; ВЫХОДИД='d20'; ВЫХОД=trpz; СВОЙСТВА=dd20;
ЭЛЕМЕНТ=t511; КОД=tab; ИМЯТАБЛ='tab5'; ВХОДИД='Длин'; ВХОД=Дл; ВЫХОДИД='d35'; ВЫХОД=trpz; СВОЙСТВА=dd35;
ЭЛЕМЕНТ=t512; КОД=tab; ИМЯТАБЛ='tab5'; ВХОДИД='Длин'; ВХОД=Дл; ВЫХОДИД='d50'; ВЫХОД=trpz; СВОЙСТВА=dd50;
ЭЛЕМЕНТ=t513; КОД=tab; ИМЯТАБЛ='tab5'; ВХОДИД='Длин'; ВХОД=Дл; ВЫХОДИД='d65'; ВЫХОД=trpz; СВОЙСТВА=dd65;
ЭЛЕМЕНТ=t514; КОД=tab; ИМЯТАБЛ='tab5'; ВХОДИД='Длин'; ВХОД=Дл; ВЫХОДИД='d80'; ВЫХОД=trpz; СВОЙСТВА=dd80;
ЭЛЕМЕНТ=t515; КОД=tab; ИМЯТАБЛ='tab5'; ВХОДИД='Длин'; ВХОД=Дл; ВЫХОДИД='d90'; ВЫХОД=trpz; СВОЙСТВА=dd90;
ЭЛЕМЕНТ=t516; КОД=tab; ИМЯТАБЛ='tab5'; ВХОДИД='Длин'; ВХОД=Дл; ВЫХОДИД='d100'; ВЫХОД=trpz; СВОЙСТВА=dd100;
ЭЛЕМЕНТ=t517; КОД=tab; ИМЯТАБЛ='tab5'; ВХОДИД='Длин'; ВХОД=Дл; ВЫХОДИД='d150'; ВЫХОД=trpz; СВОЙСТВА=dd150;
СВОЙСТВА=d110, d120, d130, d140, d150;

+ПАРАМЕТРЫ;
trpz=0; tsht=; tsht2=0;
Дл=; НарДiam=; Толщ=; кол=;
T=;
+ФОРМУЛЫ;
T=кол*(tsht+tsht2)+trpz;

+ТАБЛИЦА; ИМЯ=tab5; СТОЛБЦОВ=9;
ШАПКА=Длин; d20; d35; d50; d65; d80; d90; d100; d150;
СТРОКА=2000 16.6 16.8 16.9 17.2 17.4 17.8 15.2 15.4;
СТРОКА=3000 16.8 17.0 17.2 17.5 17.8 18.2 15.2 15.4;

```

Рис. 4. Выборка данных



```

! РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТИ В
H=10*P/UV;
Fnp=0.7854*dDy100*dDy100;
ModB=EB/(2*9.81*Fnp*Fnp);

! ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТИ В
QB=SQRT((H+hn)/ModB)*60000;
! ВРЕМЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТИ В (МИН.)
tB=(V-VB)*1000/QB;

! ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ СИФОНА В-В И ДАВЛЕНИЯ В ЕМКОСТИ В
KPB=SQRT(1/(1+EB));
QVB=KPB*Fnp*SQRT(2*9.81*HVB);
hb2=hVB+(1+EB)*((QVB*QVB)/(2*9.81*Fnp*Fnp));
VB2=VB/(1+PB);
DVB=VB-VB2;

! ПОВЫШЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ЕМКОСТИ В
PVB=VB*hb2/10;

! РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТИ Б
H=10*P/UV;
Fnp=0.7854*dDy100*dDy100;
ModB=(EB+EB)/(2*9.81*Fnp*Fnp);

! ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТИ Б
QB=SQRT((H+hn)/ModB)*60000;
! ВРЕМЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТИ Б (МИН.)
tB=(V-VB)*1000/QB;

! ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ СИФОНА В-А И ДАВЛЕНИЯ В ЕМКОСТИ Б
KPB=SQRT(1/(1+EB));
QBA=KPB*Fnp*SQRT(2*9.81*HBA);
hb1=hBA+(1+EB)*((QBA*QBA)/(2*9.81*Fnp*Fnp));
VB2=VB/(1+PBA);
DVB=VB-VB2;

! ПОВЫШЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ЕМКОСТИ Б
PBA=VB*hb1/10;

! РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТИ А
H=10*P/UV;
Fnp=0.7854*dDy100*dDy100;
ModA=(EB+EB+EA)/(2*9.81*Fnp*Fnp);

! ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТИ А
QA=SQRT((H+hn)/ModA)*60000;
! ВРЕМЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТИ А (МИН.)
tA=(V-VA)*1000/QA;
! РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ В И Б (МИН.)
tBB=tB+tB;
! РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ В, Б И А (МИН.)
tBBA=tBB+tA;

! РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА АГРЕГАТОВ ЖАЦ ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ В, Б И А (ШТ.)
n1=(3*V-VA-VB-VB)/Vn;
n=OKR(0,n1);

```

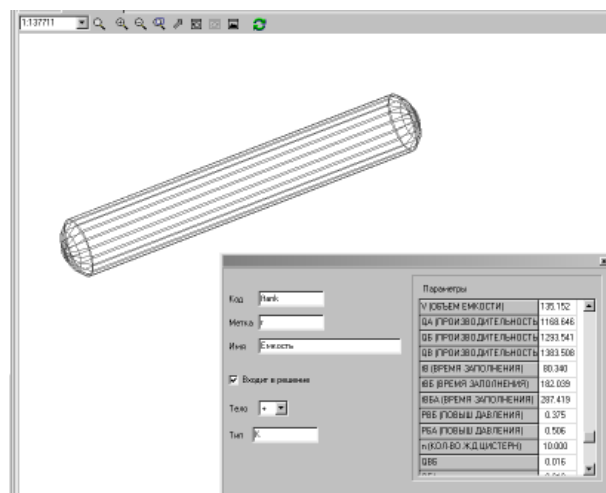


Рис. 5. Емкость СЗ и модель расчета

В качестве варьируемых геометрических параметров взяты длина обечайки (LO) и ее диаметр (DK), а в качестве контролируемых параметров — время заполнения одной, двух и трех емкостей ( $t_B$ ,  $t_{BB}$ ,  $t_{BBA}$ ), производительность заполнения емкостей А, Б и В ( $Q_A$ ,  $Q_B$ ,  $Q_V$ ), повышение давления ( $P_{VB}$ ,  $P_{BA}$ ), количество агрегатов ЖАЦ-44, необходимых для полной заливки емкостей системы ( $n$ ).

Результаты расчета сохранены в файл result.res. По результатам расчета построена зависимость величин  $n$ ,  $t_B$  и  $t_{BB}$  от LO и DK. При этом в качестве фиксируемого параметра (значение которого фиксируется при переборе значений второго параметра, затем перебор повторяется для следующего значения этого параметра) выбран диаметр DK (рис. 5).

На следующем этапе работы системы выполняют формирование проекта в Microsoft Project по схеме, представленной на рис. 6. На последней стадии процесса используют специальный макрос для загрузки ресурсов, подключенный к Microsoft Project.

Основные операции на данном этапе выполняют с помощью модуля SPMtoMSP (загрузка модели, проверка параметров, настройка опций передачи, загрузка Microsoft Project). Назначение ресурсов осуществляют уже после построе-

ния основы проекта (диаграмм Ганта) с помощью макроса, запускаемого в Microsoft Project.

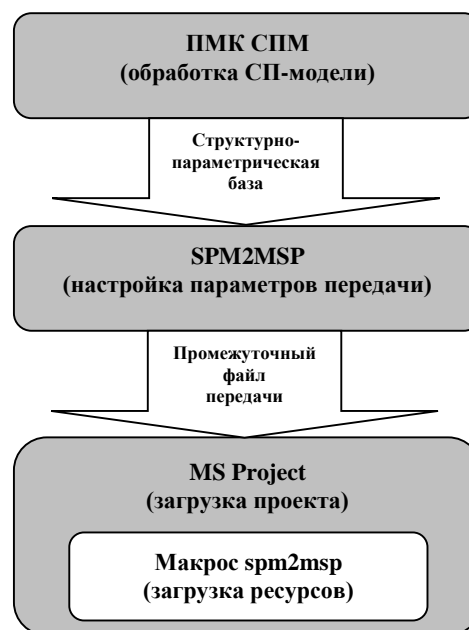


Рис. 6. Схема процесса формирования проекта в Microsoft Project

При необходимости выполняют устранение перегрузки трудовых ресурсов и их выравнивание. Это может быть сделано в автоматическом режиме (с помощью настроек макроса) либо вручную (после завершения работы макроса).

Результатом этого этапа являются проекты в Microsoft Project, представляющие варианты модели с разными исходными параметрами. Они оформляются в виде диаграмм Ганта и графиков ресурсов (рис. 7).

В итоге оценивают основные проектные характеристики, включающие длительность и стоимость работ. Значения получают для всех конфигураций модели (вариантов исходных данных). Проводят их сравнение, делают выводы.

Если в модели реализованы инженерные расчеты (на третьем этапе), результаты которых не импортируются в Microsoft Project, и они должны быть представлены в виде графиков, то для их построения используют модуль управления анализом ACSMM. Он подключается к ПМК СПМ и позволяет выполнить автоматическую обработку модели при разных значениях входных параметров. При этом вся работа ведется только с указанным модулем. Соответственно для каждого варианта получают решение, которое сохраняют для построения графика.

В зависимости от режима работы программы ACSMM могут быть получены следующие результаты.

В режиме автоматического проведения расчетов при различных значениях исходных данных результатом являются файл с полученными значениями считываемых параметров, а также

выведенная на экран модель с заданными геометрическими характеристиками. Файл результатов носит имя файла настроек или (по умолчанию) result.res и записывается в директорию, в которой находится модель.

В режиме имитации работы системы или агрегата результатом являются сохраненные в BMP- или JPG-формате кадры. В процессе работы программы на экран выводится модель, отражающая состояние системы при текущих значениях исходных параметров.

Процесс имитации состоит из двух этапов: подготовка кадров (параметрических и геометрических расчетов) и непосредственно их последовательный вывод на экран. Реализованы функции сохранения кадров, полученных при проведении имитации процессов, в стандартных растровых форматах (BMP, JPEG). Точность воспроизведения любого процесса зависит от степени его сложности, детализации модели и в конечном счете определяется пользователем.

В данном случае модуль работает в режиме проведения автоматических расчетов.

В итоге на последнем этапе с помощью функций модуля ACSMM выполняется построение графиков, отражающих исследуемую зависимость (рис. 8).

Применение данного модуля позволяет формализовать процедуры имитации механических процессов и автоматизации расчетов в СПМ, что обеспечивает удобство анализа зависимости между параметрами модели и создания технологических роликов для анализа исследуемых процессов.

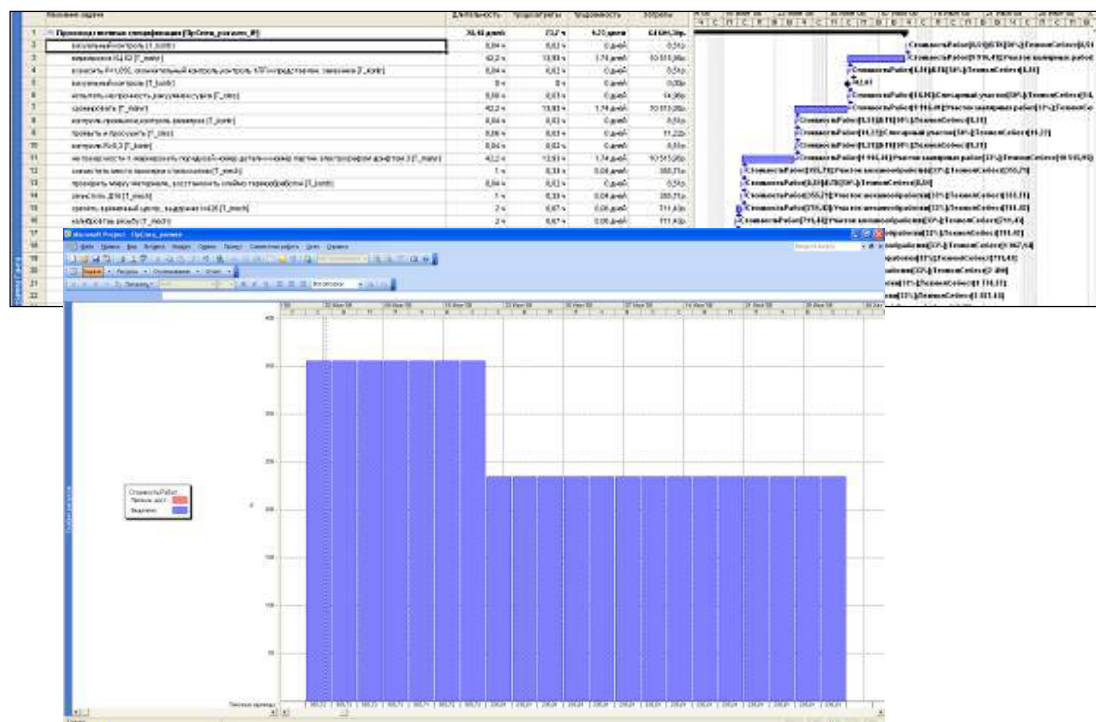


Рис. 7. Представление результатов в Microsoft Project

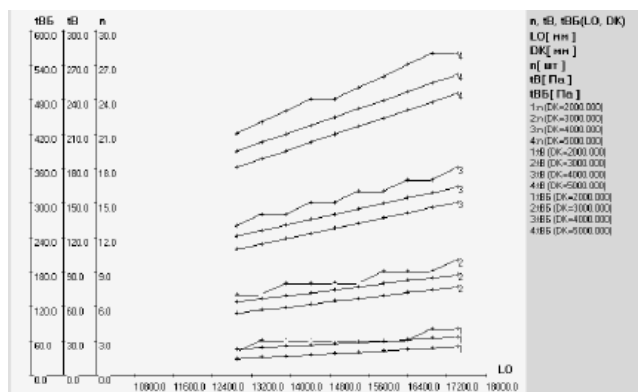


Рис. 8. Представление результатов расчетов

Таким образом, с использованием предложенного программного обеспечения инженеры реализуют основные этапы проектирования в рамках единой комплексной системы, включающей геометрический моделлер, технологический моделлер, пакет управления проектами, модуль интерфейса, модуль управления анализом и макрос загрузки ресурсов.

### Заключение

Разработанный программный комплекс проектирования был использован для построения элементов единой корпоративной информацион-

ной системы управления предприятием на основе САПР NX, ПМК СПМ и системы управления проектами Microsoft Project.

По результатам эксплуатации системы на предприятии было установлено повышение производительности труда проектировщиков в процессах подготовки производства в 1,2—1,3 раза.

Заметный эффект снижения длительности процессов подготовки производства обеспечивается возможностью использования единой среды проектирования и планирования, что снижает потери времени на согласование и передачу информации между объектами при технико-экономической оценке состояния предметной области.

### Литература

1. Цыркoв А. В. Методология проектирования в мультиплексной информационной среде. — М.: ВИМИ, 1998. — 281 с.
2. Цыркoв А. В., Сычев В. Н., Бутко А. О. Особенности реализации методики поддержки базы технологических процессов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2011. № 4. С. 32—39.
3. Сычев В. Н., Цыркoв А. В. Моделирование организационно-технологических решений в производстве технических систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 2. С. 12—18.
4. Цыркoв А. В., Цыркoв Г. А. Система управления технологическими данными // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2010. № 2. С. 3—10.

## FEATURES OF SOFTWARE APPLICATION IN THE FRAMEWORK OF INTEGRATED DESIGN PROCESSES

A. O. Butko

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

*We offer a set of software tools and a technique for integrated computer-aided modeling and planning that allows building of a unified design environment and production preparation system within the enterprise on the basis of electronic design and technological solutions. The system is based on an information model developed in an invariant linguistic modeling environment. The solution can be used in any task that requires modeling and optimization of pre-production processes for technical products.*

**Keywords:** project management, automation, programming, technological processes, rationing, data transformation, modeling, structural modeling, parametric modeling.

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

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2019 г.

УДК 681.3.06

## ПРИМЕНЕНИЕ ВИЗУАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ BPMN ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА (Обзор)

А. И. Власов, канд. техн. наук; Л. В. Журавлева, канд. техн. наук; В. В. Казаков  
ФГБОУ ВО "Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)", Москва, Россия

*Представлен сравнительный анализ визуальных методов моделирования IDEF (Integrated DEfinition) и BPMN (Business, Process, Model and Notation). Проведен анализ применения визуального метода BPMN в активных системах. Дан анализ базовых инструментов визуального метода BPMN: модель, диаграмма, элементы. Рассмотрены вопросы применения визуальных инструментов для моделирования технологической подготовки производства изделий электронной техники. Показано, что на каждом из этапов сквозного проектирования, технологической подготовки производства и серийного выпуска информация об изделии может быть представлена в виде визуальных моделей определенного уровня детализации.*

**Ключевые слова:** системный анализ, визуальные инструменты, активные системы, IDEF, BPMN, технологическая подготовка производства, Business Process Model and Notation.

Производственные процессы непрерывно усложняются. Происходит глубокая цифровизация производства. Все это предъявляет новые требования к методам управления производством, планирования затрат временных и материальных ресурсов. В условиях реализации концепции "Индустрия 4.0" на первое место выходят задачи более активного внедрения цифровых синхронных технологий сквозного проектирования и производства, которые обуславливают ускорение жизненного цикла продукции [1]. Такой подход позволяет реализовывать в производстве интегрированные "smart"-решения. Становится возможным решение проблем синхронизации процессов интегрированных производств, снижения общей трудоемкости и трудоемкости построения и эксплуатации информационных систем для формального описания, хранения и обработки данных и знаний об их объектах и процессах, обеспечения требования "однократности ввода данных в систему" [2].

Системная интеграция производства (в иностранной литературе — реинжиниринг бизнес-процессов (производственных процессов)) заключается в комплексе действий, направленных на реформирование основных этапов производства. Для комплексного описания производственных процессов необходимо использовать эффективные инструменты, которые позволяют обеспечивать высокую наглядность информации, ее простую интерпретируемость, гибкость, масштабируемость и вместе с тем полноту охвата описываемых процессов. Для решения этой задачи всё чаще стали применять визуальные модели [2—19].

Производство — это сложная система, состоящая из большого числа взаимосвязанных подсистем [20]. Одной из важнейших подсистем является подсистема технологической подготовки производства (ТПП). Ее грамотная организа-

ция может принести максимальные выгоды. Такая ТПП обеспечивает гибкость производства при изменении программы и сроков выпуска, при освоении новых изделий [2]. Ее модель должна учитывать формальное представление как объектов производства (деталей, сборочных единиц), так и производственных процессов (в том числе технологических). При этом на первое место выдвигаются вопросы снижения сроков подготовки производства за счет ее комплексной цифровизации [2—4].

Под технологической подготовкой производства понимают совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску изделий заданного уровня качества при установленных сроках, объеме выпуска и затратах [2, 5].

Процесс решения задач по технологической подготовке производства является итеративным. На всех его этапах возможны большие временные, финансовые и материальные потери, которые могут привести к снятию изделия с производства и в конечном счете к потере рынков сбыта.

Работа на всех этапах ТПП регулируется стандартами и регламентами (ЕСТПП, ОСТПП и т. п.) [5]. Решение задач ТПП предусматривает широкое применение типовых процессов, стандартного оборудования, оснастки, средств автоматизации проектных и управленческих процессов [2—4]. Организация ТПП требует ее всестороннего моделирования с учетом всех аспектов цифрового производства. В процессе ТПП при системной интеграции производства применяют методы типизации, группирования, унификации, симпликации и агрегирования и т. д.

Типизация элементов системы проводится на основе методов пошаговой типизации [21—24]. Группирование предполагает объединение элементов исходя из целенаправленности опреде-



ления показателей и возможных направлений воздействий на соответствующие совокупности свойств изделий. Оно обеспечивает снижение затрат на разработку индивидуальных технологических процессов (ТП), позволяет сокращать сроки ТПП [25]. Унификация предполагает определение номенклатуры объектов одинакового функционального назначения (деталь, сборочная единица и т. п.) и их использование при создании новых изделий [26]. Симплификация — форма стандартизации, при которой уменьшается количество типов или других разновидностей изделий до числа, достаточного для удовлетворения существующих потребностей [26]. Агрегирование — принцип создания изделий из унифицированных стандартных агрегатов (автономных сборочных единиц), используемых в изделии в различном количестве и комбинациях [26]. Реализуемые модели ТПП должны обеспечивать эффективное применение данных методов.

Следует отметить, что многие предприятия в связи с нехваткой аналитической информации о новых методах моделирования производственных процессов, сложностью сбора, хранения и обработки комплексной информации о них пока не готовы эффективно внедрять методы моделирования ТПП [6]. Одной из ключевых проблем дальнейшей цифровизации промышленности является проблема формального, компактного, просто интерпретируемого описания производственных систем и процессов широким кругом специалистов.

Цель работы — обсуждение особенностей применения визуальных методов и средств представления объектов, обеспечивающих анализ производственных процессов на всех уровнях декомпозиции в легко интерпретируемой визуальной форме.

Среди эффективных визуальных инструментов построения моделей производственных систем можно выделить как целый ряд хорошо зарекомендовавших себя решений, так и относительно новые инструменты и подходы.

Классические структурно-функциональные модели, построенные согласно требованиям стандарта IDEF, который был предложен в рамках программы ICAM (Integrated Computer-Aided Manufacturing) по автоматизации промышленности, реализуемой ВВС США (на данный момент он стандартизован в РФ на уровне ГОСТ) [7], хорошо зарекомендовали себя при исследовании характеристик промышленного производства.

В большинстве случаев для создания моделей производственных систем используют штатное расписание. Одним из недостатков применения IDEF0 для построения модели производственного процесса является неявный учет деятельности конкретного работника согласно штатному расписанию. Такой учет может быть осуществлен через элементы модели — "механизмы" (М). При этом работы, выполняемые одним ра-

ботником на одном рабочем месте (переходы — атомарный уровень моделирования), могут быть формализованы средствами нотации IDEF3.

Модели производственных систем целесообразно строить в концепции "агент—менеджер", когда выделяют активные элементы (активаторы действий). В качестве таких элементов могут выступать как непосредственно сотрудники предприятия, так и элементы технических систем. В данной работе авторы рассматривают модели производственных систем с точки зрения социально-производственной системы, где учитываются не только технические, но и социальные аспекты деятельности предприятия. В работе [8] для представления поведения объектов сложной структуры предложено использовать элементы теории конечных автоматов. Работа [9] посвящена вопросам моделирования производственных систем на основе положений теории систем массового обслуживания (СМО). Вопросам применения относительно новой технологии моделирования архитектуры предприятия — ARCHIMATE — посвящена работа [10]. В работах [11—14] проведен детальный анализ проблем развития и использования визуальных методов и средств на различных этапах проектирования и эксплуатации сложных социально-производственных систем. Однако, как показывают эти и другие исследования, вопросам рассмотрения производственных систем как активных систем (содержащих активные элементы) уделяется еще недостаточно внимания.

В работе [14] подробно рассмотрены особенности нотации перспективной технологии моделирования — BPMN (Business Process Model and Notation — модель и нотация бизнес-процессов). BPMN предложена Business Process Management Initiative (BPMI) и с 2005 г. поддерживается и развивается Object Management Group (OMG) [15, 16]. Международной организацией по стандартизации принят стандарт "ISO/IEC 19510:2013. Information technology — Object Management Group. Business Process Model and Notation". Развитие технологии BPMN курируется организацией OMG, которая также занимается продвижением UML (предназначен для моделирования объектно-ориентированных систем). В связи с этим в BPMN при моделировании (разработке диаграмм) помимо понятий и концепций структурного подхода (действие, поток управления, объект данных и т. д.) используют такие характерные для объектно-ориентированного подхода понятия, как сообщение, обмен сообщениями и поток сообщений [14]. Основной особенностью BPMN является построение активных моделей посредством связи организационно-штатной структуры и непосредственно производственных процессов, что позволяет использовать данный подход для моделирования активных систем.

В общем случае под активной системой понимают систему, функционирование которой

зависит от другой системы. Исходя из энергетического определения активной системой считают такую систему, для управления которой требуется дополнительный источник энергии. В качестве примера технических активных систем можно привести системы активного снижения акустического шума, где для формирования компенсирующего сигнала применяют дополнительный управляемый источник энергии [27].

Одним из самых ярких активных элементов активной системы является человеческий фактор. Теория активных систем с позиций учета активности человека развивалась с начала 70-х гг., когда стало понятно, что без учета человеческого фактора решение большинства задач в области управления сложными организационными системами не представляется возможным. В работе [28] сформулированы основные положения теории и практики активных систем. Подробный анализ тенденций развития исследования активных систем представлен в работе [29]. Показано, что задача управления деятельностью человека, коллектива, общества является одной из самых сложных задач теории управления [28]. Отмечено также, что в отличие от самой сложной технической системы человеко-машинные системы и человек как их активный элемент обладают свойствами активности (имеют свои цели, обладают способностью искажения информации (обмана), способностью сознательного саботажа и т. п.). Задача управления такими активными объектами и составляет сущность теории активных систем [29].

В 1969 г. В. Н. Бурковым было сформулировано понятие активного элемента как объекта управления, обладающего функциями активности. Для управления организационными системами с активными элементами предложен принцип "открытого управления". Суть последнего заключается в том, что если есть оргсистема из элементов со своими интересами и центром, который выражает интересы системы в целом, то управляющие воздействия центра не всегда будут наилучшими для отдельных активных элементов. Следовательно, для обеспечения наиболее эффективной работы системы в целом центр должен формировать такие управляющие воздействия, которые будут выгодны отдельным элементам, решая тем самым задачу оптимизации согласованных планов [29–31]. На этапе становления теория активных систем рассматривалась рядом авторов с позиций информационной теории иерархических систем на основе теории игр с непротивоположными интересами, что более емко отражало суть решаемых задач [32]. Основное внимание на начальных этапах развития теории активных систем уделялось принципу согласованного планирования, который предполагал назначение элементам системы только таких планов, которые им выгодно выполнять (согласованных планов) [29]. Другим аспектом развития теории явля-

лось исследование принципа многоканального (многовариантного) управления. В зарубежной литературе элементы теории активных систем рассматривались с позиций теории контрактов, теории реализуемости, теории управления проектами и т. д.

Среди ключевых задач теории активных систем можно выделить распределение (планирование) ресурсов, оценку деятельности и стимулирования, противозатратные механизмы ценообразования, решение задач управления на основе деловых игр и т. д. [29]. Все перечисленные задачи продолжают быть актуальными. Производственные системы в условиях цифровизации промышленности становятся все более сложными, ценность предоставляемой активными элементами информации в систему все более возрастает, что определяет требования к моделям производственных систем. Как было показано в работах [33, 34], использование инструментов теории принятия решений в распределенных системах с элементами активных систем позволило предложить эффективные методы реинжиниринга производственных процессов и систем.

Как уже было показано, термин "активные системы" является более общим, применимым при рассмотрении как технических, так и человеко-машинных систем. Большое число работ по активным системам в технике, промышленности, экономике создало сложности при их анализе и систематизации, что привело к формированию отдельного направления — теории управления организационными системами, которое исследует методы повышения эффективности организационно-производственных структур. В общем случае теория активных систем является базовым ядром, которое включает непосредственно теорию активных систем, теорию иерархических игр и оптимизацию иерархических структур, элементы системного анализа и механизмы проектного управления, на основе которого развиваются отдельные функциональные (технические, экономические, организационные, информационные и т. д.) направления исследований.

Решение задач управления активными системами предполагает управление составом, структурой, ограничениями, мотивационное управление, информационное управление, управление функционированием [35].

В данной работе проведен анализ возможности применения визуальных методов моделирования активных систем. Проведен анализ особенностей применения нотаций IDEF0 и BPMN 2.0 для моделирования сложных социально-производственных систем.

Для обобщенной оценки возможностей применения визуальных методов при описании производственных систем результаты сравнительного анализа картированы [17]. Решение проблем системного проектирования производственных систем сосредоточено на использова-

нии визуального моделирования в качестве основного инструмента генерации, хранения и обработки знаний по конкретной предметной области [14].

### Анализ классических графических методов описания систем

При анализе сложных систем требуется использовать специальные инструменты анализа структуры и взаимосвязей системы и ее элементов. Для этого выделяют четыре основных подхода к систематизации знаний об исследуемой системе в графической (визуальной) форме (рис. 1) [20]. На рисунке толщина линий, связывающих центральный блок с периферийными, символизирует количество информации, заложенной в модели, а также величину гибкости и информативности модели.



Рис. 1. Классификация (MindMap) визуальных методов систематизации знаний о системе

Самой простой из представленных на рис. 1 моделей является модель черного ящика. Эта модель подразумевает представление всей системы как некоторого объекта, имеющего управляющие входы и целевые выходы. Входы представляют собой внешние факторы, которые позволяют получить желаемый результат от системы, а выходы описывают цели системы, которые она должна достичь. Однако простота модели "черного ящика" обманчива. Всегда существует опасность неполноты составления перечня входов и выходов как вследствие того, что важные входы и выходы могут быть сочтены несущественными, так и в силу неизвестности некоторых из них в момент построения модели. Пример визуализации системы как черного ящика представлен на рис. 2.

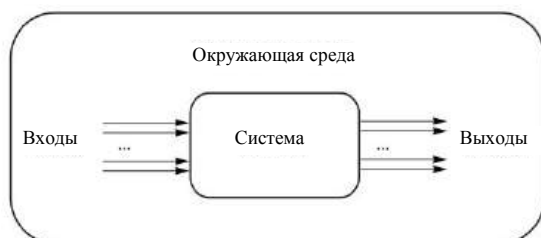


Рис. 2. Визуальное представление системы как черного ящика

Следующей по сложности является модель состава системы (рис. 3), отражающая внутренние компоненты системы, из которых она состоит.

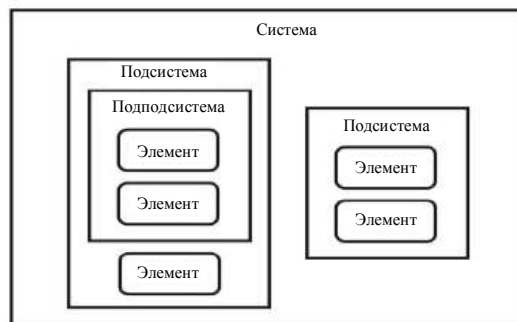


Рис. 3. Визуальное представление системы как модели состава

При рассмотрении любой системы прежде всего обнаруживается, что ее целостность и обособленность (отображенные в модели черного ящика) выступают как внешние свойства. Внутренность же "ящика" оказывается неоднородной, что позволяет различать составные части самой системы. При более детальном рассмотрении некоторые части системы могут быть, в свою очередь, разбиты на составные части и т. д. Те части системы, которые рассматривают как неделимые, принято называть "атомарными элементами". Части системы, состоящие более чем из одного элемента, называют подсистемами. При необходимости можно ввести обозначения или термины, указывающие на иерархию частей (например, "подподсистемы" или "подсистемы такого-то уровня"). В этом случае систему можно представить не только в графической форме, но и в форме таблицы, где колонками будут служить уровни системы (системы, подсистемы и элементы).

Такая форма представления имеет один существенный недостаток: она не отражает связи элементов внутри самой системы. Для решения этой проблемы предложена модель структуры системы, которая отражает лишь элементы системы и связи между ними [20]. Такое представление может иметь форму таблицы или графа.

Перечень связей между элементами (т. е. структура системы) является отвлеченной, абстрактной моделью: установлены только отношения между элементами, но не рассмотрены сами элементы. На практике безотносительно к элементам упоминать о связях между ними можно лишь после того, как отдельно рассмотрены сами элементы, т. е. рассмотрена модель состава. Теоретически модель структуры можно изучать отдельно. Бесконечность природы проявляется и в том, что между реальными объектами, вовлеченными в систему, имеется невообразимое (возможно, бесчисленное) количество отношений.

Когда рассматривается некоторая совокупность объектов как система, из всех отношений важными, т. е. существенными для достижения цели, являются лишь некоторые. Точнее, в модель структуры, т. е. в список отношений,

включается только конечное число связей, которые существенны по отношению к рассматриваемой цели. Пример визуализации структуры системы представлен на рис. 4.

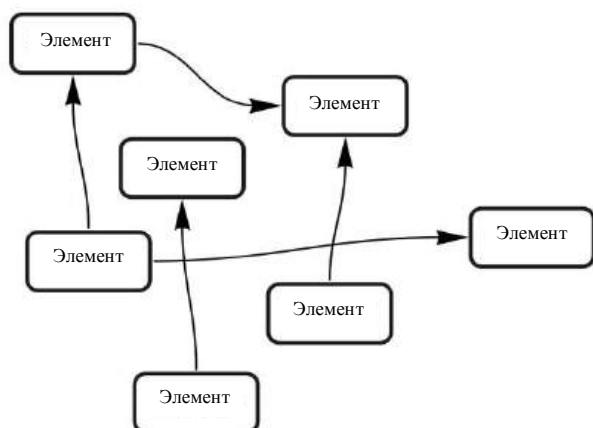


Рис. 4. Визуальное представление структуры системы

Следует отметить, что в представлении элементы структуры системы не имеют иерархии и располагаются хаотично.

Развитием всех трех перечисленных методов визуализации систем стал метод "структурной схемы" системы, который объединил в себе достоинства всех предыдущих методов. В структурной схеме атомарные блоки представлены как черные ящики, но связи между блоками в виде стрелок имеют смысл, аналогичный структурной схеме. Иерархия достигается методом модели состава системы.

Наиболее подробной и полной из рассмотренных графических моделей исследуемой системы является структурная схема системы (рис. 5). При этом остается актуальным вопрос об адекватности указанной модели, разрешаемый только на практике.

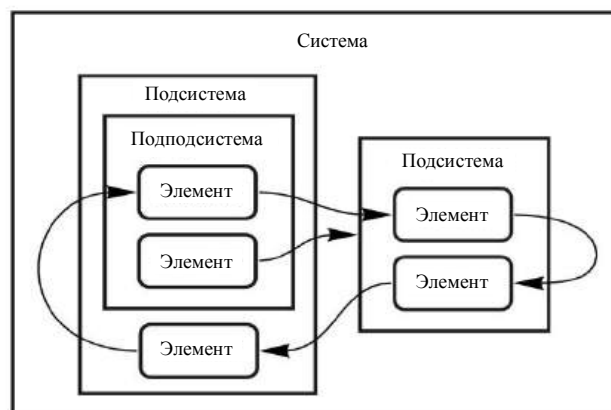


Рис. 5. Визуальное представление структурной схемы системы

По результатам анализа методов визуального представления систем можно сделать вывод о том, что визуальное описание систем предполагает отражение если не всех, то наиболее значимых частей системы, а также связей между различными составляющими системы, будь то подсистемы или отдельные элементы системы [20].

При выборе метода визуализации для формализации производственных процессов предприятия необходимо учитывать две группы требований:

- возможность представления производственных процессов предприятия и его составных частей (технологических, информационных, организационных);
- представление сценариев производственного процесса.

Первая группа требований при выборе графической нотации имеет возможность визуализации в графическом виде особенностей деятельности предприятия, приведенных на рис. 6.

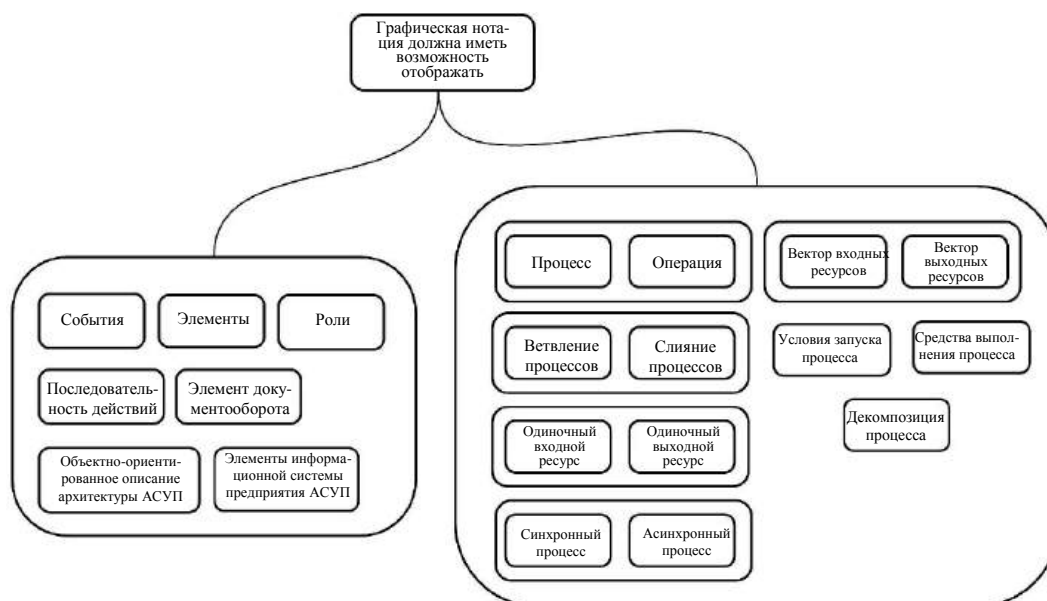


Рис. 6. Необходимые возможности отображения для графической нотации



Данные требования формируют запросы как к средствам визуализации, так и к средствам описания базы знаний предметной области. Классические структурные методы, кратко проанализированные в данном разделе, не позволяют удовлетворить все требования при описании сложных производственных систем, как не содержат текстовой нотации и являются "одно-экранными".

### Анализ метода структурно-функционального моделирования IDEF0

Метод — структурно-функционального моделирования IDEF0 включает текстовую и графическую нотации. Графическая нотация предусматривает построение иерархической системы диаграмм [2, 7]. Текстовая нотация включает систематизированное описание каждого из элементов модели, в том числе элементов информационного слоя.

Сначала проводится описание системы в целом и повествуется о ее взаимодействии с внешней средой (контекстная диаграмма), после чего проводится структурно-функциональная декомпозиция. При этом система разбивается на подсистемы и каждая подсистема описывается отдельно в виде диаграмм декомпозиции. Затем каждая подсистема разбивается на более мелкие и т. д. до достижения нужной степени подробности. При анализе производственных систем за атомарный уровень декомпозиции принимают уровень перехода технологической операции. Операции — набор действий, выполняемых одним работником на одном рабочем месте. Операционная диаграмма строится с использованием метода IDEF3 [11–13].

Каждая IDEF0-диаграмма содержит функциональные блоки и отношения [7]. Блоки изображают функции моделируемой системы и называются отлагольными существительными. Отношения связывают блоки вместе и отображают взаимодействия и взаимосвязи. Синтаксис и правила построения диаграмм IDEF0 и IDEF3 подробно раскрыты в [7, 36]. В данной работе основное внимание уделяется тем особенностям визуальных моделей, которые раскрывают ее "активные" свойства.

При разработке моделей согласно IDEF0 для удобного ее когнитивного восприятия рекомендуется, чтобы в диаграмме было не менее трех и не более шести — восьми блоков. Блоки в IDEF0 могут размещаться в порядке доминирования. Порядок доминирования, это когда блоки размещаются по степени взаимовлияния, как ее понимает автор диаграммы. Такой относительный порядок называется доминированием. Доминирование понимается как влияние, которое один блок оказывает на другие блоки диаграммы. Например, операция "Подготовка комплектующих" располагается до блока "Сборка". Например, самым доминирующим блоком диаграммы может быть либо первый из

требуемой последовательности функций, либо планирующая или контролирующая функция, влияющая на все другие. При анализе производственных систем отдельные работы могут выполняться параллельно, тогда этот факт тоже должен найти свое отражение на диаграмме и данные блоки должны располагаться параллельно одной из сторон рабочего поля диаграммы. Наиболее доминирующий блок обычно размещается в верхнем левом углу диаграммы, а наименее доминирующий — в правом углу. Расположение блоков на странице отражает авторское определение доминирования. Таким образом, топология диаграммы показывает, какие функции оказывают большее влияние на остальные. Чтобы подчеркнуть это, разработчик может перенумеровать блоки в соответствии с порядком их доминирования или использовать цветовые маркеры. Порядок доминирования может обозначаться цифрой, размещенной в правом нижнем углу каждого прямоугольника: цифра 1 указывает на наибольшее доминирование, цифра 2 — на следующее и т. д.

Взаимодействие работ с внешними воздействиями и между собой представляется в виде стрелок, изображаемых одинарными линиями со стрелками на концах. Стрелки представляют собой материальный и информационный потоки между блоками и именуются существительными.

В IDEF0 различают пять типов стрелок [3]. Они представлены на рис. 7.



Рис. 7. Типы стрелок, применяемых в IDEF0

Вход (I — Input) — объекты, используемые и преобразуемые работой для получения результата (выхода). Допустимо, что работа может не иметь ни одной стрелки входа. Стрелку входа рисуют как входящую в левую грань работы.

Управление (C — Control) — информация, управляющая действиями работы. Обычно управляющие стрелки несут информацию, которая указывает, что должна выполняться работа. Каждая работа должна иметь хотя бы одну стрелку управления, которую изображают как входящую в верхнюю грань работы.

Выход (O — Output) — объекты, в которые преобразуются входы. Каждая работа должна иметь хотя бы одну стрелку выхода, которую рисуют как исходящую из правой грани работы.

Механизм (М — Mechanism) — ресурсы, выполняющие работу. Стрелку механизма рисуют как входящую в нижнюю грань работы. При описании активных элементов системы используют именно стрелки "механизм", с помощью которых можно задать участвующий в выполнении конкретной работы персонал. При этом данные стрелки могут быть декомпозированы, т. е. заданы уровни группировки персонала: отделы—бригады—группы—конкретный исполнитель. Свойства стрелок позволяют связать их с наборами данных (информационный уровень), а свойства работ позволяют связать работу и ее активные механизмы с ролями по обработке данных, поступающих на данную работу. Выделяют следующие основные роли: *I* — вставка; *U* — изменение; *D* — удаление; *R* — чтение; *W* — запись. Этим достигается возможность описания активных элементов и их действий в системе на функциональном и информационном уровнях средствами IDEF0.

Вызов (Call) — специальная стрелка, указывающая на другую модель работы. Стрелку вызова рисуют как исходящую из нижней части работы и используют для указания того, что некоторая работа выполняется за пределами моделируемой системы.

В методе IDEF0 используют только пять типов взаимодействий между блоками для описания их отношений: связь по входу; связь по управлению; обратная связь по входу; обратная связь по управлению.

Классификация видов отношений в форме иерархической ментальной карты представлена на рис. 8.

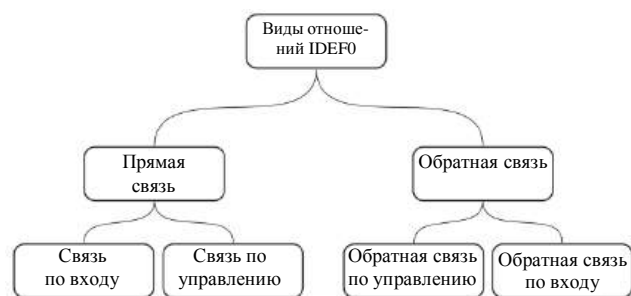


Рис. 8. Классификация видов отношений

Отношения по управлению и входу являются простейшими, поскольку они отражают прямые воздействия, которые интуитивно понятны и очень просты.

Отношение управления возникает тогда, когда выход одного блока непосредственно влияет на блок с меньшим доминированием. Это отношение тоже играет значительную роль при построении модели активной системы, так как может отражать элементы влияния на активный компонент системы.

Обратная связь по управлению и обратная связь по входу являются более сложными, поскольку представляют собой итерацию или ре-

курсию: результаты одной работы влияют на будущее выполнение других работ.

Обратная связь по управлению возникает тогда, когда выход некоторого блока влияет на блок с большим доминированием.

Связи "выход—механизм" встречаются нечасто. Они отражают ситуацию, при которой выход одной функции становится средством достижения цели для другой. Такие связи характерны при распределении источников ресурсов (например, требуемые инструменты, обученный персонал, физическое пространство, оборудование, финансирование, материалы).

Важным аспектом при реализации IDEF0-моделей является учет фактора множественности отношения. Обычно множественное отношение символизирует набор объектов. Так как отношения представляют собой наборы объектов, они могут иметь множество начальных точек (источников) и конечных точек (назначений). Поэтому отношения могут разветвляться и соединяться различными способами. Отношение или его часть может выходить из одного или нескольких блоков и заканчиваться в одном или нескольких блоках.

Разветвление отношений, изображаемое в виде расходящихся линий, означает, что содержимое отношений или его часть может появиться в каждом ответвлении. Отношение всегда помечается до разветвления, чтобы дать название всему набору. Кроме того, каждая ветвь отношения может быть помечена или не помечена в соответствии со следующими правилами:

- непомеченные ветви содержат все объекты, указанные в метке отношения перед разветвлением;
- ветви, помеченные после точки разветвления, содержат все объекты или их часть, указанные в метке отношения перед разветвлением.

Слияния отношений в IDEF0, изображаемые как сходящиеся вместе линии, указывают на то, что содержимое каждой ветви, являющейся результатом слияния исходных отношений, идет на формирование метки для отношения. После слияния результирующее отношение всегда помечается для указания нового набора объектов, возникшего после объединения.

Кроме того, каждая ветвь перед слиянием может помечаться или не помечаться в соответствии со следующими правилами:

- непомеченные ветви содержат все объекты, указанные в общей метке отношения после слияния;
- помеченные перед слиянием ветви содержат все или некоторые объекты из перечисленных в общей метке после слияния;
- количество блоков на диаграмме *N*;
- уровень декомпозиции диаграммы *L*;
- сбалансированность диаграммы *B*;
- число стрелок, соединяющихся с блоком, *A*.

Данный набор факторов относится к каждой диаграмме модели. Так как основные активные элементы на диаграммах выражаются в виде "отношения" типа "М", построение визуальной модели с акцентом на отражение ее активности требует от разработчика большого внимания и аккуратности при задании и декомпозиции отношений. Это вызывает определенные трудности при разработке активной модели системы.

Основные коэффициенты, отражающие эффективное построение типовых диаграмм в нотации IDEF0, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты эффективности модели

Коэффициент и расчетная формула	Краткое описание
$N$	Количество блоков на диаграмме
$L$	Уровень декомпозиции диаграммы
$B$	Сбалансированность диаграммы
$K_b = \left  \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N} - \max_{i=1}^N (A_i) \right $	Коэффициент сбалансированности диаграммы
$d = \frac{N}{L}$	Коэффициент уровня декомпозиции
$A$	Число стрелок, соединяющихся с блоком
$C$	Число совпадений имен блоков со словами из словаря

Необходимо стремиться к тому, чтобы количество блоков на диаграммах нижних уровней было ниже количества блоков на родительских диаграммах, т. е. чтобы с увеличением уровня декомпозиции коэффициент убывал. Таким образом, убывание коэффициента  $d$  свидетельствует о том, что по мере декомпозиции модели функции должны упрощаться. Следовательно, количество блоков должно убывать. При этом необходимо, чтобы коэффициент сбалансированности диаграммы  $K_b$  был минимален для диаграммы.

Помимо анализа графических элементов диаграммы необходимо рассматривать наименования блоков. Для оценки имен составляется словарь элементарных (тривиальных) функций моделируемой системы. Фактически в данный словарь должны попасть функции нижнего уровня декомпозиции диаграмм. После формирования словаря и составления пакета диаграмм системы следует рассмотреть нижний уровень модели. Если на нем обнаружатся совпадения названий блоков диаграмм и слов из словаря, то это говорит о том, что достаточный уровень декомпозиции достигнут. Коэффициент, количественно отражающий данный критерий, можно записать как произведение  $LC$  уровня модели на число совпадений имен блоков со словами из словаря. Чем ниже уровень модели (больше  $L$ ), тем ценнее совпадения.

Основные ошибки при разработке типовых диаграмм процессов в нотации IDEF0 представлены в табл. 2.

Основные противоречия и методы их решения при разработке диаграмм в нотации IDEF0 рассматривают на примерах видов отношений, представленных на рис. 9.

Таблица 2

Основные ошибки при разработке типовых диаграмм в IDEF-моделях

Ошибки	Название и расчетная формула	Краткое описание ошибок
Синтаксические (ошибки использования правил языка)	Неверное написание имен блоков	Ошибки в названии блоков, пунктуации и т. д.
	Отсутствует дескрипт действия в названии блока	Название блока является не отглагольным существительным
Логические (ошибки разработки сути модели)	Ошибки использования различных типов связей	Неверное или неуместное использование тех или иных видов связей между блоками
	Нарушение логики процесса	Нарушение логики следования блоков диаграммы

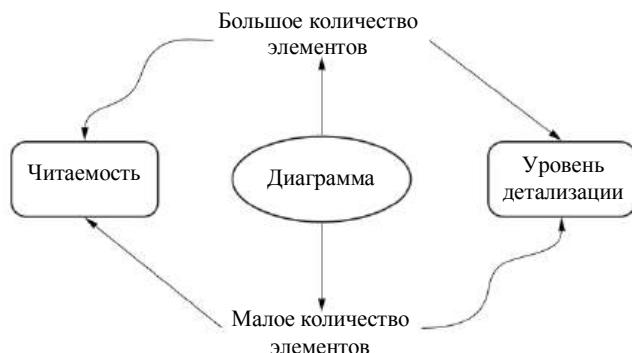


Рис. 9. Карта противоречий количества элементов на диаграмме

### Противоречие читаемости и уровня детализации диаграммы

При большом числе блоков диаграмма становится нечитаемой, но имеет высокий уровень детализации. При небольшом количестве элементов диаграмма становится читаемой, но имеет низкую детализацию модели. В IDEF0 эта проблема решается уровнями декомпозиции модели. Разбив модель на уровни детализации, можно сократить количество элементов на каждом уровне, что позволяет, сохранив уровень детализации всей модели в целом, сохранить читаемость каждого уровня декомпозиции. Рекомендуется разделять модели на уровни, не перегружая каждую из диаграмм деталями без особой необходимости.

Активные элементы модели задают посредством отношений "Механизмы" (М). Их роли по выполнению конкретной работы (блока) описывают в свойствах работы, роли по обработке данных по данной работе на информационном уровне задают в свойствах работы. Роли определяют набор действий активного элемента при выполнении конкретной работы. Воздействия на активные элементы можно задавать через отношения типа "Управление" (С). С позиции построения модели активной системы переход от структурно-функциональной (IDEF0) к процессной (IDEF3) модели возможен только на уровне операции, т. е. когда уже определены исполнитель действия и место действия.

### Анализ визуального метода проектирования BPMN 2.0

Модель BPMN (нотация и модель бизнес-процессов) применяется для разработки исполняемой модели любого процесса с участием активных агентов (таких, как человек) [37—39]. Модель описывает последовательность изменения состояния системы во времени [7]. Модель включает широкий набор элементов для описания процессов разных типов (например, производственных процессов на предприятии). В данной работе рассмотрено только их ограниченное подмножество, используемое для моделирования конкретных производственных процессов.

Выполнение производственного процесса всегда связано с одним или несколькими информационными потоками. Хотя нотация BPMN не предусматривает возможности моделирования структур данных, она позволяет изображать информационные сущности. Для этого используют графические элементы "объект данных" и "ассоциация". Существуют два способа отображения факта передачи объекта данных между операциями процесса [3]. Во-первых, направленная ассоциация явно указывает движение информационного объекта от источника к получателю. При этом возникает ощущение, что потоки управления и данных существуют независимо друг от друга, что неверно: если поток управления направлен на логиче-

ский оператор, управляемый данными, то маршрутизация определяется значением информационного объекта. Во-вторых, ненаправленная ассоциация связывает объект данных с потоком управления. Такая форма подчеркивает, что потоки управления и данных есть одно и то же. Если в ходе моделирования процесса возникает необходимость отобразить статус обработки, можно опционально описать состояние объекта данных, заключив его в квадратные скобки.

Существуют два типа моделей производственного процесса (рис. 10).



Рис. 10. Типы моделей производственного процесса

Когда строится аналитическая (информационная) модель процесса, в качестве объекта управления обычно выбирают какой-либо документ, важный с точки зрения выполняемого задания. Если строится исполняемая модель процесса, то выделяется переменная характеристика процесса, которая движется вдоль диаграммы. В ней происходят качественные изменения, отражающие ход выполнения процесса. Ее прибытие в узел активирует выполнение очередной операции.

Переменная характеристика процесса есть параметр объекта управления. Ее изменение образует поток управления. Таким образом, маркер в исполняемой модели ассоциируется с объектом управления. На некотором интервале времени состояние системы можно определить через переменную состояния. Объект управления процессом связывается с переменной состояния. Состояние процесса определяется не только распределением маркеров по сети, но и статусом переменной состояния в текущий момент времени. Это очень важный вывод, поскольку он существенно облегчает анализ бизнес-процесса, позволяет по-новому разрабатывать его архитектуру.

Смена объекта управления означает разделение сквозного процесса на подпроцессы. Сквозной процесс следует рассматривать как систему взаимодействующих подпроцессов. При этом у каждого подпроцесса есть свой объект управления. Поскольку состояние процесса определяется не только положением маркера на диаграмме, но и состоянием самого объекта управления, диаграмма потоков работ должна быть согласована с диаграммой состояний соответствующего объекта управления. Весь процесс и отдельная операция сохраняются. Сумма входных потоков равна сумме выходных. Поскольку нотация BPMN не ограничивает применение неструктурированных паттернов и непарных логических

операторов, устранение возникающих коллизий является задачей аналитиков.

Модель процесса определяет не только порядок исполнения, но и временное расписание исполнения. Поток управления на диаграмме BPMN образуется в результате движения объекта управления (рис. 11) [37—39].

Основная цель BPMN — создание визуального представления, понятного всем участникам производственного процесса от руководства до рабочего. Функционал BPMN обеспечивает связь между фазой разработки бизнес-процесса и фазой его реализации.

Существует несколько конкурирующих стандартов для моделирования производственных процессов [39]. Применение BPMN может унифицировать способы представления базовых концепций производственных процессов, а также более сложные концепции (например, обработка исключительных ситуаций, компенсация транзакций) [37—39].

Моделирование в BPMN осуществляется посредством диаграмм с небольшим числом графических элементов. Это помогает пользователям быстро понимать логику процесса. Выделяют четыре основные категории элементов [14]:

- объекты потока управления (события, действия и логические операторы);
- соединяющие объекты (поток управления, поток сообщений и ассоциации);
- роли (пулы и дорожки);
- артефакты (данные, группы и текстовые аннотации).

Элементы этих четырех категорий позволяют строить простейшие диаграммы производственных процессов (ДПП). Для повышения выразительности модели спецификация разрешает создавать новые типы объектов потока управления и артефактов. Спецификация BPMN и рекомендации по разработке диаграмм приведены в работе [14].

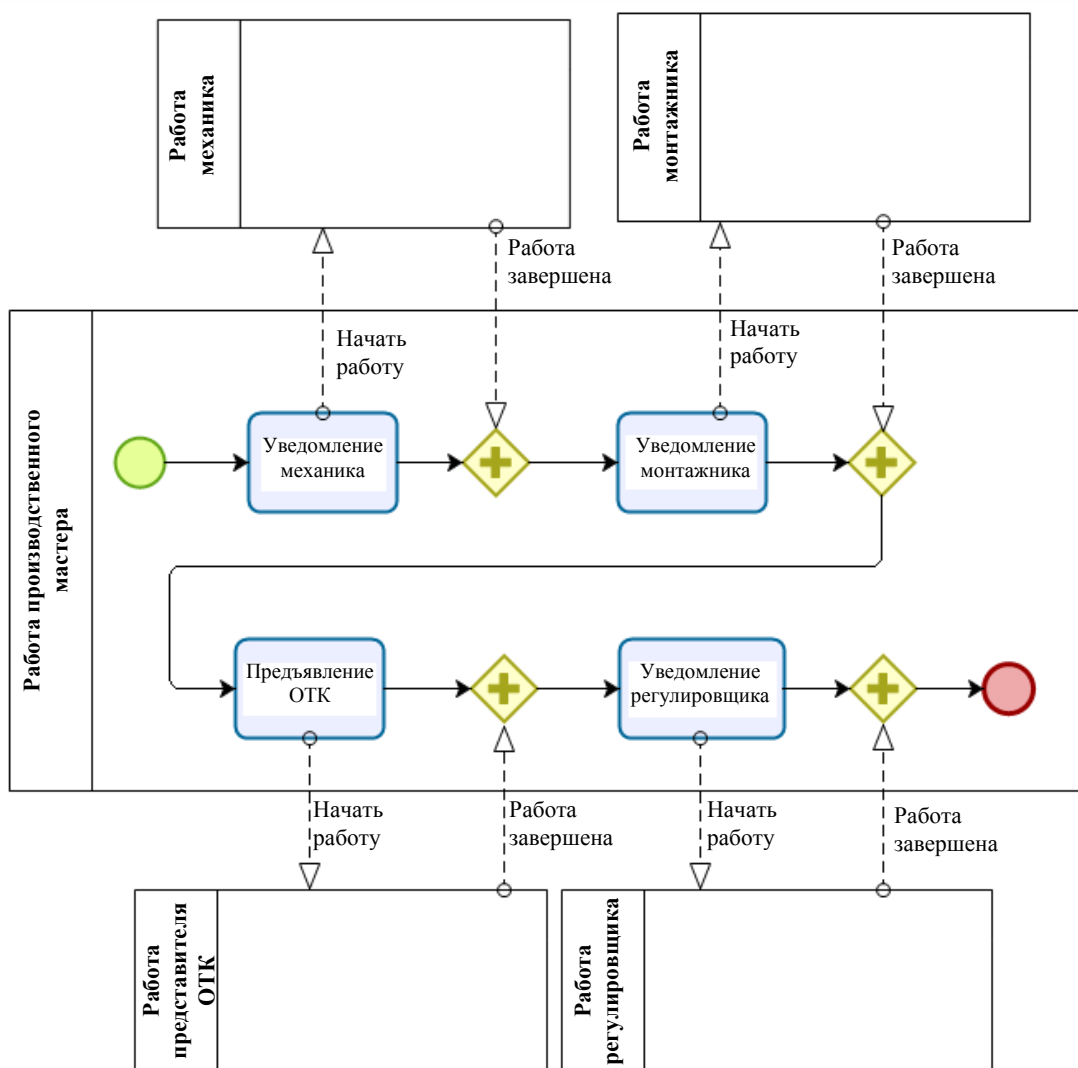


Рис. 11. Диаграмма публичных (открытых) процессов производства усилителя на TDA2030



BPMN поддерживает лишь набор концепций, необходимых для моделирования производственных процессов. Моделирование иных аспектов помимо производственных процессов находится вне зоны внимания BPMN. Несмотря на то, что BPMN позволяет моделировать потоки данных и потоки сообщений, а также ассоциировать данные с действиями, она не является эффективным инструментом для анализа информационных потоков.

### Сравнительный анализ IDEF и BPMN 2.0

По результатам анализа особенностей методов IDEF и BPMN 2.0 можно констатировать, что основные проблемы нотации IDEF0 состоят в слишком большой абстракции, а ресурсные потоки и потоки событий выглядят одинаково (рис. 12) [7, 36].



Рис. 12. Категории элементов нотации BPMN

Нотация BPMN предназначена для описания диаграмм бизнес-процессов, понятных как техническим специалистам, так и руководящему составу предприятия [37—39]. Графические аспекты нотации разделены по конкретным категориям. Совокупность категорий нотации невелика, что позволяет читателю схемы BPMN легко узнавать основные типы элементов и облегчает понимание схемы.

В BPMN хорошо идентифицировать потоки событий. Роли и средства производственного процесса разделяются и могут быть описаны в виде дорожек и внешних модулей соответственно.

BPMN не ориентирована на описание ресурсных потоков, что затрудняет описание технологических и логистических процессов, использующих большое количество разных ресурсов.

BPMN хорошо ориентирована на описание архитектуры программного обеспечения и хорошо представляет логику синхронных и асинхронных процессов и событий, поддерживает выход на динамическое моделирование процессов.

Результаты сравнительного анализа методов IDEF (IDEF0/IDEF3) и BPMN 2.0 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты сравнительного анализа методов IDEF0 и BPMN 2.0

Возможность представления в графической нотации	IDEF	BPMN
Процесс, операция	+	+
Одиночные входные и выходные ресурсы	+	-
Вектор входных и выходных ресурсов	-	-
Состав процесса (декомпозиция)	+	+
Условия запуска процесса	-	+
Средства выполнения процесса	+	+
Ветвления и слияния процессов	+	+
Асинхронные и синхронные процессы	+	+
Представление элементов внешней среды в виде отдельных блоков (например, модулей подсистемы)	-	+
Элемент организационной структуры	+	+
Событие (например, инцидент, проблема, запрос и т. д.)	-	+
Роль в процессе	+	+
Элемент сценария действий (операция)	+	+
Последовательность действий, сценарий (переходы с ветвлениями и синхронизацией)	+	+
Поток ресурсов	+	-
Элемент процесса (элемент информационной системы)	+	++
Элемент документооборота (бумажного, электронного)	+	+
Выход на динамическое моделирование выполнения сценария	-	+
Представление активных элементов	+	++
Объектно-ориентированное описание архитектуры	-	-

По результатам анализа графических нотаций IDEF0 и BPMN 2.0 метод BPMN можно рекомендовать для описания типовых производственных процессов с использованием организационно-штатной структуры и детализации персонифицированных функций системы. Метод BPMN 2.0 целесообразно использовать для формализации и динамического моделирования выполнения активных сценариев в рамках производственного процесса.

### Заключение

Проведенный анализ показал, что модель процесса в нотации BPMN следует классифицировать не как диаграмму потоков работ, а как

диаграмму потоков управления. Она изначально показывает наибольшее число объектов, характеризующих динамику поведения системы, позволяет описать расписание исполнения и бизнес-правила, имеет детализацию уровня действий, показывает все варианты исполнения.

Для описания процессов производственных предприятий (технологических, логистических, организационных) целесообразно использовать нотацию мультиагентных процессов преобразования ресурсов, построенную в результате интеграции нотаций IDEF.

### Литература

1. Карпунин А. А., Власов А. И. Обработка данных с распределенным реестром в концепции "Индустрия 4.0": сб. "Энергосбережение и эффективность в технических системах". Мат. V Межд. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. — Тамбов, 2018. С. 120—121.
2. CALS-технологии в технологической подготовке производства авиакосмической техники / под ред. Година Э. М. — М.: Изд-во МАИ, 2005. — 552 с.
3. Власов А. И., Михненко А. Е. Информационно-управляющие системы для контрактных производителей электроники // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2006. № 3. С. 15—21.
4. Власов А. И., Михненко А. Е. Принципы построения и развертывания информационной системы предприятия электронной отрасли // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2006. № 4. С. 5—12.
5. ГОСТ Р 50995.3.1-96 Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства. Постановление Госстандарта России от 11 декабря 1996 г. № 674.
6. Шеер А.-В. Бизнес-процессы. Основные понятия. Теория. Методы. — Весть-МетаТехнология, 1999. — 182 с.
7. ГОСТ Р 50.1.028-2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. Постановление Госстандарта России от 2 июля 2001 г. № 256-ст.
8. Кознов Д. В. Конечный автомат — основа для визуальных представлений поведения объектов: сб. "Объектно-ориентированное визуальное моделирование". — СПб., 1999. С. 101—122.
9. Мезенцев К. Н. Моделирование систем в среде AnyLogic 6.4.1: учеб. пособие. Ч. 2 / под ред. Николаева А. Б. — М.: МАДИ, 2011. — 103 с.
10. Кочешков А. Э., Карпунин А. А. Технология ARCHIMATE — новый стандарт моделирования архитектуры предприятия // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4 (168). С. 3—9.
11. Власов А. И. Системный анализ технологических процессов производства сложных технических систем с использованием визуальных моделей // Межд. научно-исследовательский журнал. 2013. № 10—2 (17). С. 17—26.
12. Власов А. И. Концепция визуального анализа сложных систем в условиях синхронных технологий проектирования // Датчики и системы. 2016. № 8—9 (206). С. 19—25.
13. Власов А. И. Пространственная модель оценки эволюции методов визуального проектирования сложных систем // Датчики и системы. 2013. № 9 (172). С. 10—28.
14. Власов А. И., Гоношилов Д. С. Системный анализ производства с использованием визуальных инструментов BPMN // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 3. С. 10—16.
15. Введение в описание бизнес-процессов [Электронный ресурс]. Код доступа: <http://becmology.ru/blog/business/bp01.htm> (дата обращения: 26.03.2018).
16. Абдикеев Н. М., Данько Т. П., Ильдеменов С. В., Киселев А. Д. Реинжиниринг бизнес-процессов. — М.: Эксмо, 2005.
17. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Картирование потока создания ценностей в концепции "Бережливое производство" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 2 (162). С. 23—27.
18. Vlasov A. I., Demin A. A. Visual methods of formalization of knowledge in the conditions of the synchronous technologies of system engineering: ACM International Conference Proceeding Series 13. "CEE-SECR 2017. 2017. С. 3166098.
19. Vlasov A. I., Juravleva L. V., Shakhnov V. A. Visual environment of cognitive graphics for end-to-end engineering project-based education // J. Appl. Eng. Sci. 2019. № 17 (1). P. 99—106.
20. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ: учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. Школа, 1989.
21. САПР. Методы типизации комплексов и компонентов Метод. рекомендации : МР 234-86 ВНИИ по нормализации в машиностроении.
22. Костюков В. Д., Болдырев К. Н., Островерх А. И., Хохлов А. В., Цырклов А. В. Проектирование технологической подготовки производства для механической обработки ДСЕ РКТО: тр. межд. научн. конф. "Системы проектирования технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM)". ИПУ РАН. 2006.
23. Костюков В. Д., Островерх А. И., Сычев В. Н., Лобова С. А. Формирование модели технологической подготовки производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2006. № 2. С. 13—26.
24. Тотаи А. В. Технология машиностроения. — М.: Юрайт, 2018. — 239 с.
25. Митрофанов С. П., Куликов Д. Д., Миляев О. Н., Подун Б. С. Технологическая подготовка гибких производственных систем. — Л.: Машиностроение, 1987. — 352 с.
26. Сергеев А. Г. Метрология, стандартизация и сертификация. — М.: Юрайт, 2014. — 838 с.
27. Власов А. И. Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 1997. № 11. С. 59.
28. Бурков В. Н., Новиков Д. А. Теория активных систем: состояние и перспективы — М.: Синтег, 1999.
29. Бурков В. Н., Новиков Д. А. Теория активных систем (История развития и современное состояние) // Проблемы управления. 2009. № 3.1. С. 28—35.
30. Бурков В. Н., Лернер А. Я. Принцип открытого управления. — М.: ИАТ, 1974.
31. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. — М.: Наука, 1977.
32. Гермейер Ю. Б. Игры с непротиворечивыми интересами. — М.: Наука, 1976.
33. Балашов В. Г., Ириков В. А. Технологии повышения финансового результата предприятий и корпораций. — М.: ПРИОР, 2002. — 512 с.
34. Ириков В. А., Тренев В. Н. Распределенные системы принятия решений. — М.: Наука, 1999.
35. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами — М.: Физматлит, 2005.
36. Маклаков С. В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite. — М.: Диалог-МИФИ, 2005.
37. Ko R. K. L., Lee S. S. G., Lee E. W. Business Process Management (BPM) Standards: A Survey // Business Process Management J., Emerald Group Publishing Limited. 2009. V. 15. Is. 5.
38. White S. A., Bock C. BPMN 2.0 Handbook Second Edition: Methods, Concepts, Case Studies and Standards in Business Process Management Notation. — Future Strategies Inc., 2011.
39. Grosskopf, Decker and Weske. (Feb 28, 2009). The Process: Business Process Modeling using BPMN. Meghan Kiffer Press.

## APPLICATION OF BPMN VISUAL INSTRUMENTS IN MODELING TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION

(Review)

A. I. Vlasov, L. V. Zhuravleva, V. V. Kazakov  
FSBEIHE "Bauman Moscow State Technical University", Moscow, Russia

*This paper discusses the use of visual tools of the BPMN method for modeling the technological preparation of the production of electronic equipment. A comparative analysis of the visual methods IDEF and BPMN is presented. BPMN analysis was carried out and its advantages over other visual methods were examined. The basic BPMN toolkit is described: model, diagram, elements. The effectiveness of obtaining integrated assessments of structural and technological solutions using BPMN at all stages of the life cycle is evaluated. It is shown that at each of the stages of development, technological preparation of production and serial production, product information can be interpreted as a visual model of a certain level of detail.*

**Keywords:** system analysis, visual tools, active systems, IDEF, BPMN, technological preparation of production, Business Process Model and Notation.

---

**Власов Андрей Игоревич**, заместитель заведующего кафедрой по научной работе.

E-mail: vlasovai@bmstu.ru

**Журавлева Людмила Васильевна**, доцент кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: fogel@mail.ru

**Казakov Владимир Вячеславович**, магистрант кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: kazakov.vadim@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 10 ноября 2019 г.*

УДК 004.38+004.9

## КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ И НОВЫЕ МОДЕЛИ ВЫЧИСЛЕНИЙ

П. А. Правильщиков, канд. техн. наук

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

*Кратко изложены причины квантовой революции и постепенного ухода кремниевых технологий. Обсуждаются две схемы новых моделей вычислений для модульных проблемно-ориентированных квантовых компьютеров (КК), в частности рассматривается вторая модель квантового генератора тестов (КГТ-2), где используется механизм гипермассового параллелизма, подогнанный под выполнение квантовых D-алгоритмов (QD-алгоритмов). Показано, что для создания надёжных модульных КК их регистр должен быть построен на сложных кунитах — куэнках. Продемонстрировано, что модульные КК и их модель в виде КГТ-2 могут преодолеть проблемы с использованием большого числа ( $L > 50$ ) запутанных кубитов при разработке КК и при этом временная сложность решения NP-полных задач на платформе КГТ-2 останется полиномиальной.*

**Ключевые слова:** модульные квантовые компьютеры, квантовые ускорители, квантовый параллелизм, кубиты, кутриты, куквадриты, куниты, куэнки, квантовые модели вычислений.

Под моделью вычислений примем идеальную вычислительную систему, введённую вместо некоторого реального квантового вычислительного устройства и построенную так, чтобы сохранялись только существенные для данного исследования свойства этого устройства [1]. Прежде чем перейти к описанию новых квантовых моделей вычислений следует напомнить, что многие системы управления, системы автоматического проектирования (САПР) и системы технической диагностики, криптографические программы, программы компьютерной графики и программы в области искусственного интеллекта (ИИ) работают на платформе тех или иных компьютеров, созданных с помощью кремниевых технологий.

Заметим, что некоторые специалисты различают узконаправленный ИИ (УИИ), общий ИИ (ОИИ) и искусственный суперинтеллект (ИСИ). Примерами УИИ, имеющего очень узкие области применения, являются программы распознавания голосовых команд и программы, способные отвечать на вопросы, программы-переводчики с одного языка на другой, шахматные программы. Подчеркнём, что программы, способные обыграть человека в шахматы, не могут отвечать на вопросы, т. е. им не хватает известного универсализма, характерного для человека и его разума. Под ОИИ понимают ИИ, который не менее универсален, чем человеческий разум в решении самых разных задач. Под ИСИ понимают ИИ, который значительно превосходит человеческий разум. Часто его связывают с выполнением перебора при решении сложных задач, который не может выполнить человеческий мозг. По мнению автора, стратегически важная задача создания ИСИ может быть решена только на платформе КК, способного в потенциале выполнять перебор практически в неограниченных масштабах.

Производительность "кремниевых" компьютеров имеет предельное значение, так как "про-

гресс вычислительной техники (ВТ) на этом пути имеет естественный предел, определяемый минимально возможными размерами элементов, близкими к атомным, и способными представлять классические биты, а также предельным значением числа транзисторов на кристалле и в компьютере в целом, определяемым сложностью межэлементных связей" [2, с. 20, 21]. Кремниевые технологии уже приблизились к этому пределу, наступает их закат.

На закате кремниевых технологий в ВТ происходит очередная революция — квантовая. Отход от кремниевых технологий связан с существенным удорожанием оборудования для реализации новых 5-, 3- и 2-нанометровых техпроцессов, а также с неприемлемо низким процентом выхода годных. В этих условиях производство новых чипов становится экономически невыгодным (более детально см. [1, 3—5]). Кроме того, у кремниевых технологий существуют конкуренты — новые классические технологии, прежде всего технологии производства схем на основе графена [6], а также на основе нитрида галлия (GaN) [7]. Главным конкурентом классических кремниевых технологий, по мнению автора, являются квантовые технологии для производства КК [1, 5, 8—11]. Квантовые технологии для производства КК и первые коммерчески-доступные КК олицетворяют квантовую революцию в ВТ и, следовательно, в информационных технологиях (ИТ). Квантовая революция и появление первых коммерчески доступных КК открывают новые перспективы в *computer* и *control science*, связанные с использованием КК в управлении, криптографии, в области ИИ, в области САПР и технической диагностике, в компьютерной графике, а также в материаловедении (компьютерный дизайн материалов), в разработке новых лекарств для ранее неизлечимых болезней. Появление КК создаёт потребность в квантовых алгоритмах, гарантирующих квантовое превос-

ходство (превосходство КК в решении некоторых задач, которые не может решить никакой традиционный классический суперкомпьютер за приемлемое время).

Квантовая революция, по мнению автора, началась ещё в 2007 г., когда канадская компания D-wave systems представила свой первый коммерческо-доступный КК Orion, у которого регистр содержал всего 16 кубитов. Существуют коммерческо-доступные КК компании D-wave systems с регистром, число  $L$  кубитов в котором равно 2000, и коммерческо-доступный КК американской корпорации IBM (20-кубитный КК) [5]. Заметим, что регистр КК компании D-wave systems с  $L = 2000$  может хранить  $2^{2000}$  больших двоичных чисел: их разрядность равна 2000. Подчеркнём, что значение  $2^{2000}$  много больше современной оценки числа атомов в наблюдаемой Вселенной. (Оценки числа атомов во Вселенной колеблются от  $4 \cdot 10^{79}$  до  $10^{81}$ , а  $10^{81} \approx 2^{273} \ll 2^{2000}$ .) Однако не все кубиты КК D-wave systems находятся в запутанном состоянии. Поэтому некоторые физики не считают КК D-wave systems полноценными. Вместе с тем в США, несмотря на достаточно высокую стоимость (15 млн долл.), военно-промышленная корпорация Локхид Мартин уже приобрела КК компании D-wave systems. Такие же КК приобрели компания Google, ЦРУ и ФБР (США). Известны многочисленные прототипы КК компаний IBM (регистр этого КК содержит 53 запутанных кубита), Google (КК Bristlecone), Intel (КК Tangle Lake), Microsoft, а также прототипы КК многих университетов США, Австралии, Израиля, академий наук Китая и Австрии. В РФ три исследовательские группы получили значительные средства для создания универсального КК (более подробно см. в [1]). В 2016 г. в Физтехе (Москва) был создан квантовый центр, а в 2019 г. такой же квантовый центр был создан в МГУ. В ИПУ РАН теоретически обоснован и разрабатывается проблемно-ориентированный КК, т. е. квантовый ускоритель (КвУ), а также его программная модель на основе двух моделей вычислений: КГТ-1 [1, 12–14] и КГТ-2 [15, 16]. Потребность в новых моделях вычислений связана с критикой, которой подвергаются классическая машина Тьюринга и её модификации, а также с появлением первых коммерческо-доступных КК и многочисленных прототипов новых КК. Появление первых КК показало, что для них классическая машина Тьюринга и её модификации непригодны. В связи с этим уместно привести критические высказывания известных специалистов в области КК по поводу машины Тьюринга. Так, пионер квантовых вычислений Д. Дойч утверждает [17]: "Квантовое вычисление — это нечто большее, чем просто более быстрая и миниатюрная технология реализации машин Тьюринга. Квантовый компьютер — это машина, использующая уникальные квантовомеханические эффекты, в особенности интерференцию, для выполнения

совершенно новых видов вычислений, которые даже в принципе невозможно выполнить ни на одной машине Тьюринга, а следовательно, ни на каком классическом компьютере. Таким образом, квантовое вычисление — это ни что иное, как принципиально новый способ использования природы". Далее он пишет: "Теория вычислений традиционно изучалась абстрактно, как раздел чистой математики. При этом теряется ее суть. Компьютеры — это реальные физические объекты, а вычисления — это реальные физические процессы. Поэтому то, что могут вычислить компьютеры, и то, что они вычислить не могут, определяется исключительно законами физики, а не чистой математикой". Затем Д. Дойч добавляет: "Тьюринг надеялся, что его абстрактная бумажная модель настолько проста, открыта, четко определена и понятна, что не зависит ни от каких допущений относительно физики, без которых её можно было бы исказить постижимым образом, и, следовательно, она может стать фундаментом абстрактной теории вычислений независимо от лежащей в ее основе физики. "Он считал, — как однажды выразился Р. Фейнман, — что он понял бумагу". Но он (Тьюринг) ошибался. Реальная квантовомеханическая бумага очень отличается от того абстрактного материала, который используется машиной Тьюринга".

В том же духе высказался и другой специалист в области КК, Дж. Прескилл [18, с. 30]: "Результаты тридцатилетних исследований в теории сложности вычислений так и останутся математическими истинами, как, например, теоремы, характеризующие возможности классических компьютеров. Но они не устоят как физические истины, поскольку классическая машина Тьюринга — неподходящая модель вычислений, которые могут быть реально выполнены в физическом мире. Если квантовая классификация сложности действительно отличается от классической (как подозревается, но пока не доказано), тогда этот результат перевернет основы computer science. В долгосрочной перспективе этот результат также может сильно повлиять на технологию".

Известна такая модель вычислений, как квантовая машина Тьюринга (КМТ) [19; 20, с. 33]. Однако и она не является универсальной, так как в её основе лежат кубиты, а уже известны прототипы КК, у которых регистр построен на кутритах [21, 22] и кунитах (англ. эквивалент *qudit*) [23]. Поэтому попытки использования КМТ также оказались непопулярными. В связи с этим некоторые специалисты задаются вопросами: "Существует ли универсальная модель вычислений? Всегда ли будут оставаться не до конца поняты явления, обладающие потенциальной возможностью быть использованными для вычислений?" Окончательного ответа на эти вопросы нет [20, с. 173]. Именно поэтому в условиях квантовой революции в ВТ возникает потребность в новых, не



всегда универсальных моделях вычислений. Основой таких отечественных моделей (КГТ-1 и КГТ-2) являются закон сохранения перебора (ЗСП) и квантовый параллелизм, основанный на регистре КК, построенном из таких разрядов, как куниты. Подчеркнём, что квантовый параллелизм является частным случаем механизма гипермассового параллелизма.

В данной работе кунит рассматривается как некоторый абстрактный математический объект, свойства которого описываются вектором состояния  $|\psi\rangle_v$ . Физические основы кунитов здесь не рассматриваются. Кунит может одновременно содержать  $v$  чисел. Суперпозиция его вектора состояния  $|\psi\rangle_v$  имеет вид

$$|\psi\rangle_v = a_1 \cdot |0\rangle + a_2 \cdot |1\rangle + \dots + a_\xi \cdot |\xi - 1\rangle + \dots + a_v \cdot |v - 1\rangle \left| \sum_{\xi=1}^v |a_\xi|^2 = 1. \quad (1)$$

В (1) коэффициенты  $a_1, a_2, \dots, a_\xi, \dots, a_v$ , называемые амплитудами, в общем случае являются комплексными числами. В настоящей работе рассматриваются только действительные амплитуды, так как в большинстве задач дискретной математики комплексные числа не встречаются. В (1) справа приведено условие нормировки. Символ  $v$  обозначает количество различных чисел, которые может хранить один квантовый разряд. С позиций квантовой механики (КМ) число  $v$  может быть больше любого наперёд заданного числа  $\tilde{N}$ . Практически достижимым числом  $v$ , по мнению американского физика Д. Авшаломы (D. Awschalom), является число  $v \leq 10^7$ , т. е. один кунит может одновременно содержать миллионы чисел, если в качестве его основы используется спин атомного ядра (более подробно см. [28]). Также  $v$  обозначает размерность гильбертова пространства  $\mathcal{H}$  (см. далее).

Отметим, что физикам в Венском университете впервые удалось перевести молекулу  $C_{70}H_{260}F_{908}N_{16}S_{53}Zn_4$ , содержащую 1948 атомов, в состояние суперпозиции и удерживать в течение семи миллисекунд. Такая молекула в состоянии суперпозиции может стать физической основой кунита в регистре КК. Если учесть, что состояние одного атома в молекуле (или спин атомного ядра этого атома в молекуле) может принимать только два значения (0 и 1, одновременно), то такой кунит может одновременно содержать  $2^{1948}$  больших двоичных чисел. Это почти столько же, сколько может содержать весь регистр целиком в КК D-wave systems.

Частными случаями кунита являются кубиты ( $v = 2$ ), кутриты ( $v = 3$ ) и куквадриты ( $v = 4$ ).

Их суперпозиции имеют вид

$$|\psi\rangle_v = |\psi\rangle_2 = a_1 |0\rangle + a_2 |1\rangle \left| |a_1|^2 + |a_2|^2 = 1. \quad (2)$$

$$|\psi\rangle_v = |\psi\rangle_3 = a_1 |0\rangle + a_2 |1\rangle + a_3 |3\rangle \left| |a_1|^2 + |a_2|^2 + |a_3|^2 = 1. \quad (3)$$

$$|\psi\rangle_v = |\psi\rangle_4 = a_1 |0\rangle + a_2 |1\rangle + a_3 |3\rangle + a_4 |4\rangle \left| |a_1|^2 + |a_2|^2 + |a_3|^2 + |a_4|^2 = 1. \quad (4)$$

### Закон сохранения перебора

Ещё на заре кибернетики в 60-е годы XX в. многие учёные в СССР предлагали решать задачи с помощью перебора, так как "перебор универсален" [24]. Однако традиционные классические компьютеры часто не справляются с полным перебором за приемлемое время. КК, используя квантовый параллелизм, быстро справляются с перебором в процессе решения сложных задач, что показали работы П. Шора (P. Shor), разработавшего в 1994 г. квантовый алгоритм факторизации [25, 26]. КК с регистром, содержащим 1000 запутанных кубитов, используя алгоритм Шора, может "взломать" любой документ, зашифрованный алгоритмом RSA, по некоторым оценкам приблизительно за 80 с.

Формально временная сложность алгоритма Шора (алгоритма факторизации сколь угодно больших целых чисел  $N$ ) при использовании  $O(\log N)$  кубитов оценивается как  $O[(\log N)^3]$  или  $O(\log^3 N)$ . Классические алгоритмы, решающие ту же задачу, имеют экспоненциальный класс сложности. Это имеет решающее значение с точки зрения криптографии. Так, RSA-шифрование основано на неразрешимости задачи факторизации больших целых чисел, которая означает, что не существует классического алгоритма, решающего задачу в общем виде за полиномиальное время [19, с. 174].

Для решения других труднорешаемых задач можно выполнить перебор, например, с помощью QD-алгоритмов [27, 28].

Ранее в ИПУ РАН из дискретного аналога известной "физической" теоремы Нётер (аналоги теоремы Нётер имеются в гидрогазодинамике, термодинамике, квантовой механике, а теперь и в computer science) был выведен закон сохранения перебора (ЗСП) [29—32]. Он служит основой механизма гипермассового параллелизма, подогнанного для выполнения классических параллельно-последовательных и квантовых D-алгоритмов, эффективно выполняющих полный перебор при решении некоторых задач, например булевых и алгебраических уравнений [27, 28]. Напомним, что квантовый параллелизм является частным случаем механизма гипермассового параллелизма [13, 14]. Он позволяет решать NP-полные задачи за полино-

миальное время. ЗСП характеризует такую форму движения, как движение в дискретном лабиринте  $\Lambda$ . Лабиринт  $\Lambda$  служит моделью процесса решения переборных задач [29—32]. Примерами таких задач являются прямая и обратная задачи диагностирования ( $\check{D}$  и  $\check{I}$ ) [30] либо прямая и обратная задачи ( $\check{D}$  и  $\check{I}$ ) в случае решения булевых и других уравнений [27, 28]. ЗСП ломает стереотипы многих математиков, считающих, что в случае решения, например, булевых уравнений время  $\Delta t_{\check{D}}$  решения задачи  $\check{D}$  меньше времени  $\Delta t_{\check{I}}$  решения задачи  $\check{I}$ . Заметим, что при использовании компьютеров величина перебора определяется как временная сложность (т. е. как время  $\Delta t_{\check{D}}$  или  $\Delta t_{\check{I}}$ ). Иными словами, величина  $Pr_{\check{D}}$  перебора при решении задачи  $\check{D}$  меньше, чем величина  $Pr_{\check{I}}$  перебора при решении задачи  $\check{I}$ . При использовании классических или квантовых D-алгоритмов с учётом принятых обозначений выражение для ЗСП достаточно просто:

$$Pr_{\check{D}} = Pr_{\check{I}} = Pr = \Delta t_{\check{D}} = \Delta t_{\check{I}} = \Delta t = R \text{ (вдеп)}. \quad (5)$$

В (5) вдеп — внесистемная временная дискретная единица перебора, равная времени выполнения одной элементарной операции пересечения (операции  $\alpha_j$ ) в D-алгоритмах [29—32]. Символ  $R$  обозначает число рангов в булевом уравнении или число рангов в эквивалентном комбинационном устройстве (КУ).

Решение многих сложных задач, в частности задач оптимизации, может быть выполнено только на основе полного перебора. Человеческий мозг представляет собой наисложнейшую систему обработки информации, самую сложную структуру, известную человечеству, но и он не способен выполнить перебор в большом объёме, который необходим для решения многих сложных задач. В цифровую эпоху в условиях постоянной погруженности в усложненный ландшафт ИТ и разнообразных гаджетов мозг всё чаще даёт сбой [35]. Классические компьютеры и суперкомпьютеры также не способны решать многие реальные задачи без выполнения перебора в необходимых больших объёмах [36]. Традиционные классические компьютеры чаще всего реализуют эвристические алгоритмы (например, жадные, генетические, муравьиные и т. д.) Однако эвристические алгоритмы не всегда способны найти решение сложной задачи, даже если такое решение существует. Только КК способны решать и уже решают сложные задачи с использованием большого перебора, доказывая квантовое превосходство. По мнению автора, ИСИ может быть реализован только на платформе КК, так как КК быстро решает сложные задачи, выполняя полный перебор с использованием квантового параллелизма. Именно поэтому в мире развернулась квантово-компьютерная гонка. Одной из главных причин

этой гонки являются проблемы кибербезопасности. В США проект создания полноценного и универсального КК сравнивают с атомным проектом (проектом по созданию атомной бомбы) и требуют его полноценного финансирования.

### Проблемы подхода к созданию КК с использованием "грубой силы"

Под подходом "грубой силы" понимают подход к созданию каждого нового более мощного КК путём увеличения числа  $L$  кубитов в регистре разрабатываемого КК. Этот подход основан на квантовом следствии из известного эмпирического закона Мура для классических компьютеров [37, с. 65], согласно которому КК будут развиваться наравне с классическими компьютерами, если к регистру КК каждые два года добавлять один кубит. В условиях квантово-компьютерной гонки корпорация IBM в 2014 г. на 5 лет получила на создание универсального КК 3 млрд долл. Однако используя подход "грубой силы" при решении поставленной задачи, разработчики IBM столкнулись с уменьшением времени когерентности (времени  $t_c$ ). Выяснилось, что с увеличением числа  $L$  запутанных кубитов в регистре КК время  $t_c$  уменьшается. Квантовые вычисления могут быть выполнены только за время  $t_c$ . Уменьшение времени  $t_c$  объясняется тем, что квантовое состояние (состояние когерентности) запутанных кубитов чрезвычайно хрупко. Его могут разрушить небольшой скачок температуры, слабое электромагнитное излучение (например, случайный фотон) или даже сильные звуки.

С такой же проблемой столкнулись и разработчики компаний Google, Intel и других компаний, а также разработчики различных исследовательских групп. Так, в конце 2017 г. один из руководителей IBM сообщил о завершении разработки 50-кубитного КК. Однако для нового КК IBM максимальное время  $t_c$  составило всего лишь 90 мкс. Заметим, что несмотря на встретившиеся трудности, касающиеся малого времени  $t_c$ , в IBM уверены, что за квантом — будущее.

Чтобы преодолеть встретившиеся трудности, различные исследовательские группы предложили несколько подходов. Так, в Австралии создали первые "дальнобойные" кубиты, способные обмениваться информацией на относительно больших расстояниях, что открывает дорогу для создания сложных КК [38]. Подобная "дальнобойность" кубитов означает, что теперь инженеры-физики могут создавать сложные квантовые схемы, включающие в себя десятки и сотни кубитов, работой каждого из которых они могут гибко управлять. Это, как надеются члены исследовательской команды, поможет Австралии стать победителем в "квантово-компьютерной гонке" и первой создать универсальный КК. Следует отметить, что австралийцы строят кубиты КК на основе спина

в кремнии и создали для кубитов специальную "одежду" на базе кремния и фосфора, защищающую их от помех. Это позволило им "сохранить запутанность кубитов на достаточно долгое время для того, чтобы они могли провести вычисления" [38]. Такой подход позволил им увеличить время  $t_c$  приблизительно в 10 раз. Более того, руководитель группы А. Морелло утверждает, что «... "одетый" кубит можно контролировать (т. е. управлять им) множеством способов, большинство из которых просто нельзя использовать для их "раздетых" кузенов». Возможно, использование спинов в кремнии позволит австралийцам перейти от кубитов к кутритам и даже к куквадритам. Однако проблема увеличения времени  $t_c$  сохранится до тех пор, пока разработчики будут использовать механизм квантового параллелизма на основе запутанности всех кубитов в регистре КК.

Примерно по этому же пути идут специалисты компании Intel. В Intel регистр КК может быть построен на двух типах запутанных кубитов. Первый тип — сверхпроводящие кубиты. Такие кубиты делают и конкуренты Intel. Второй тип кубитов в Intel называют спиновыми [39]. В случае таких кубитов спиновые состояния электронов и атомных ядер рассматривают в качестве на роль кандидатов в логические (цифровые) состояния кубитов. Спиновые кубиты меньше по размеру, чем сверхпроводящие. В теории они должны быть более надежными. Их можно будет масштабировать быстрее и с меньшим количеством ошибок. Как утверждают инженеры Intel, они похожи на обычные транзисторы, которых на серверных процессорах Intel миллиарды. Разработчики КК в Intel надеются, что смогут модифицировать эти транзисторы так, чтобы они работали как спиновые кубиты. Тогда развитая классическая кремниевая технология поможет создать мощнейший КК. Пока регистр прототипа КК в Intel содержит только 3 спиновых кубита, однако представители Intel уже говорят о создании КК с 1 млн кубитов.

В Intel считают, что вторая технология на основе спиновых кубитов на данном этапе уникальна. Однако по тому же пути, по-видимому, идут и разработчики КК в Австрийской АН в Вене.

Наш соотечественник М. Лукин (профессор Гарвардского университета) предполагает разработать КК, используя спиновые состояния твердых тел [40]. Его регистр будет построен на спиновых кубитах. Возможно, в будущем спиновые кубиты удастся превратить в кутриты, куквадриты или, в общем случае, в куниты.

Следующий подход к созданию надежных КК с достаточно большим временем  $t_c$  используют специалисты Microsoft, которые уже разработали специальный пакет средств разработки Quantum Development Kit для тех, кто хочет научиться программировать на КК [41]. Пакет средств квантовой разработки является частью плана Microsoft по созданию надежной, полноценной системы для квантовых вычислений,

включающей все необходимое, — от квантового оборудования до полного набора программного обеспечения. В [41] кратко изложен подход к созданию квантового оборудования в виде топологического КК. Подход Microsoft к созданию КК основан на разработке топологического кубита, который считается более надежным. Как считают эксперты из Microsoft, топологический КК обеспечит более подходящую базу для практических квантовых вычислений с возможностью масштабирования, так как при использовании подхода "грубой силы" при построении кубитов необходима коррекция множества ошибок (необходимы квантовые коды, исправляющие ошибки, и квантовые схемы, устойчивые к отказам). Подчеркнем, что при разработке многих прототипов КК первого поколения достаточно долго использовался именно подход, основанный на "грубой силе". У топологических кубитов коррекция ошибок обеспечивается самими физическими принципами построения такого кубита. Физические принципы, на которых основаны топологические кубиты, изложены в [42, с. 131].

Следующий подход (принцип построения) к созданию КК называется модульным. С его помощью может быть создан модульный КК. Модульный подход к разработке КК провозглашен в [40], где показаны физические основы создания таких КК, но ни новых квантовых алгоритмов, адаптированных к модульному КК, ни новых моделей вычислений для таких КК, ни новых квантовых вентилях или их математических описаний не приведено. Здесь же приведено описание новой модели вычислений для модульных КК несколько другого типа, а также квантового регистра, построенного из сложных (составных) кунитов — куэнков (модулей регистра КК). Заметим, что существуют детерминистические квантовые вычисления с так называемым одним чистым кубитом (*Deterministic Quantum Computation with One Pure Qubit* — DQC1 [20, с. 197]). В детерминистических квантовых вычислениях предлагается выполнять вычисления практически без перепутывания состояний кубитов в регистре КК. По сути, модель вычислений в виде КГТ-1, изложенная в [12—14], близка к детерминистическим квантовым вычислениям, но вместо кубитов использует простые куниты. Новая модель вычислений в виде КГТ-2 представляет некоторый компромисс (гибрид), когда используют запутанные кубиты в виде составных кунитов (куэнков) в регистре КК, но кубиты в разных куэнках регистра не запутаны между собой.

#### Составные куниты — куэнки и их гильбертово пространство

Составные (сложные) куниты, называемые куэнками, представляют собой некоторое множество (кластер)  $Cl_\zeta$  разрядов, в частности кубитов, в регистре  $QR$  КК:

$$Cl_\zeta = \{q_{\zeta,1}, q_{\zeta,2}, \dots, q_{\zeta,k}, \dots, q_{\zeta,\hat{n}}\}. \quad (6)$$

В (6) символ  $q_{\zeta,k}$  обозначает текущий  $k$ -й разряд в куэнке  $Cl_{\zeta}$ :  $q_{\zeta,k} \in Cl_{\zeta}$  ( $|Cl_{\zeta}| = \hat{n}$ ; и  $k = \overline{1, \hat{n}}$ ). В данной работе под разрядами куэнка  $Cl_{\zeta}$  понимаются кубиты. (По мере развития КК в качестве разряда  $q_{\zeta,k}$  может оказаться кутрит, куквадрит или, в общем случае, простой кунит). Все кубиты каждого куэнка  $Cl_{\zeta}$  находятся в запутанном состоянии. Регистр  $QR$  содержит множество  $\hat{M}$  куэнков:  $\hat{M} = \{Cl_{\zeta}\}$  ( $|\hat{M}| = \tilde{\lambda}$ ;  $\zeta = \overline{1, \tilde{\lambda}}$ ). Символ  $L$  обозначает общую длину регистра  $QR$ , т. е. общее число кубитов в  $QR$ . Напомним, что здесь каждый кубит  $q_{\zeta,k}$  рассматривается как некоторый абстрактный математический объект, описание которого задаётся суперпозицией вектора  $|\psi\rangle_2$  (см. (2)). Такой подход используется в [37, с. 33]. Кубиты из разных куэнков не находятся в запутанном состоянии, что формально можно записать в виде

$$\forall (q_{\zeta,k}, q_{\mu,r}) [q_{\zeta,k} \bar{E} q_{\mu,r}] \mid q_{\zeta,k} \in Cl_{\zeta} \ \& \ q_{\mu,r} \in Cl_{\mu}. \quad (7)$$

В (7) бинарное отношение  $\bar{E}$  является отрицанием бинарного отношения  $E$ , которое отображает состояние запутанности двух кубитов. Бинарное отношение  $\bar{E}$  ("не  $E$ ") отображает тот факт, что любая пара кубитов ( $q_{\zeta,k}, q_{\mu,r}$ ) не находится в состоянии запутанности.

В принципе длина разных куэнков может быть различной, но в данной работе предполагается, что длина всех куэнков  $Cl_{\zeta}$  одинакова и равна  $\hat{n}$ , где  $\hat{n} = \infty$ ,  $\infty \leq 50$ . Однако корпорация IBM обещает к 2025 г. построить КК, у которого регистр будет содержать 100 запутанных кубитов и при этом время  $t_c$  будет достаточно большим. В этом случае величина  $\infty$  изменится:  $\infty \leq 100$ . Для иллюстрации приведённых обозначений на рис. 1 дан пример схемы регистра  $QR$ .

Квантовый регистр $QR$											
$Cl_1$				$Cl_2$				$Cl_3$			
$q_{1,1}$	$q_{1,2}$	$q_{1,3}$	$q_{1,4}$	$q_{2,1}$	$q_{2,2}$	$q_{2,3}$	$q_{2,4}$	$q_{3,1}$	$q_{3,2}$	$q_{3,3}$	$q_{3,4}$

Рис. 1. Схема регистра  $QR$ , построенного из куэнков  $Cl_{\zeta}$

На рис. 1 множество  $\hat{M} = \{Cl_1, Cl_2, Cl_3\}$ ,  $|\hat{M}| = \tilde{\lambda} = 3$ . Куэнки:  $Cl_1 = \{q_{1,1}, q_{1,2}, q_{1,3}, q_{1,4}\}$ ;  $Cl_2 = \{q_{2,1}, q_{2,2}, q_{2,3}, q_{2,4}\}$ ;  $Cl_3 = \{q_{3,1}, q_{3,2}, q_{3,3}, q_{3,4}\}$ . Для всех куэнков  $|Cl_1| = |Cl_2| = |Cl_3| = |Cl_4| = \hat{n} = 4$  ( $\forall Cl_{\zeta} = |Cl_{\zeta}| = \hat{n} = 4$ ). Длина  $L$  регистра  $QR$  равна 12 ( $L = \tilde{\lambda} \hat{n} = 3 \cdot 4 = 12$ ). Теперь покажем, как куэнк связан с простым кунитом. Для этого

рассмотрим частный случай простого кунита — куквадрит. В простейшем случае, когда  $\hat{n} = 2$ , запишем вектор состояния  $|\psi\rangle_{v=4}$  куэнка:

$$|\psi\rangle_{v=4} = a_1|00\rangle + a_2|01\rangle + a_3|10\rangle + a_4|11\rangle \mid |a_1|^2 + |a_2|^2 + |a_3|^2 + |a_4|^2 = 1. \quad (8)$$

В (8) справа записано условие (правило) нормировки. Напомним, что при решении многих задач дискретной математики с помощью нашего КвУ (например, при решении булевых уравнений [27]) амплитуды суперпозиции, в частности суперпозиции (8), являются действительными числами. В этом случае для визуализации кубита можно привести двумерное представление [20, с. 113]. При этом многомерное векторное пространство, которое используют для описания одного или нескольких квантовых разрядов или всего регистра, в линейной алгебре называют евклидовым [43, с. 426]. Однако в соответствии с традициями КМ при описании квантового разряда или регистра КК используют термин "гильбертово пространство" (символ  $\mathcal{H}$ ) [44, с. 13].

Заменим в (8) двоичные числа в дираковских скобках десятичными

$$|00\rangle \rightarrow |0\rangle, |01\rangle \rightarrow |1\rangle, |10\rangle \rightarrow |2\rangle, |11\rangle \rightarrow |3\rangle,$$

получим ту же суперпозицию  $|\psi\rangle_{v=4}$  для куэнка:

$$|\psi\rangle_{v=4} = a_1|0\rangle + a_2|1\rangle + a_3|2\rangle + a_4|3\rangle \mid |a_1|^2 + |a_2|^2 + |a_3|^2 + |a_4|^2 = 1. \quad (8)$$

Выражение (8) полностью совпадает с (4) для куквадрита, который является простым кунитом. Значит, составной кунит (куэнк) и *простой* куквадрит с математической точки зрения эквивалентны. Следовательно, математический аппарат, описание которого приведено для простых кунитов в [33], может быть использован и для описания унитарных операций с куэнками в регистре модульного КК.

Гильбертово пространство  $\mathcal{H}$  для куквадрита имеет размерность  $\text{Dim } \mathcal{H} = v = 4$  и может одновременно содержать 4 числа. При  $\hat{n} = 2$ , т. е. когда куэнк состоит из 2 кубитов, его пространство  $\mathcal{H}$  также имеет размерность  $\text{Dim } \mathcal{H} = v = 4$  и может содержать одновременно 4 числа. Известно, что "в гильбертовом пространстве много места":  $v = 2^{\hat{n}}$ . Таблица демонстрирует это для одного куэнка, когда  $\hat{n}$  изменяется от 2 до 8.

Демонстрация масштабности гильбертова пространства для куэнка  $Cl_{\zeta}$

$\hat{n} = 2$	$\hat{n} = 3$	$\hat{n} = 4$	$\hat{n} = 5$	$\hat{n} = 6$	$\hat{n} = 7$	$\hat{n} = 8$
$v = 2^2$	$v =$	$v = 2^4$	$v = 2^5$	$v = 2^6$	$v = 2^7$	$v = 2^8$
$v = 4$	$v = 8$	$v = 16$	$v = 32$	$v = 64$	$v = 128$	$v = 128$

Если  $\hat{n} = 16$ , то  $v = 2^{16} = 65536$ ; если  $\hat{n} = 50$ , то  $v = 2^{50} \approx 1,126 \cdot 10^{15}$  ( $\approx 1,126$  квадриллиона).

Число  $\hat{n} = 16$  выбрано потому, что компания D-wave systems заявила, что к 2023 г. выпустит КК с регистром  $\approx 5000$  кубитов, которые будут разбиты на модули по 16 кубитов.

Число  $\hat{n} = 50$  выбрано потому, что в данное время  $\alpha \leq 50$ .

Здесь же целесообразно привести описание возможности разбиения гильбертова пространства  $\mathcal{H}_\zeta$  куэнка  $Cl_\zeta$  на некоторое количество  $\tilde{v}$  подпространств, например подпространств  $\mathcal{H}_{\zeta,p}$  куквадритов. Всякое подпространство  $\mathcal{H}_{\zeta,p}$  удобно использовать при решении, например, булевых уравнений [27] и других задач дискретной математики. В этом случае всякое подпространство  $\mathcal{H}_{\zeta,p} \subset \mathcal{H}_\zeta$ . Например, в случае  $\hat{n} = 3$  и  $v = 8$  (см. таблицу) пространство  $\mathcal{H}_\zeta$  может быть разбито на два подпространства ( $\tilde{v} = 2$ ):  $\mathcal{H}_{\zeta,1}$  и  $\mathcal{H}_{\zeta,2}$  ( $\mathcal{H}_{\zeta,1}, \mathcal{H}_{\zeta,2} \subset \mathcal{H}_\zeta$ ).

### Описание новой модели вычислений — КГТ-2

Всякий КК управляется классическим компьютером с помощью лазерных, СВЧ или других импульсов (см. упрощённую схему на рис. 2). Эта упрощённая схема показана на основе более сложной модели идеального КК в [45] (см. также [12, 13]). В [45] регистр КК построен на кубитах. О модульных КК, кунитах и куэнках тогда ещё речи не шло.

Схема новой модели вычислений (КГТ-2) приведена на рис. 3. Классический компьютер, управляющий КГТ-2, на нем не показан (см. рис. 2). Регистр  $QR$  КвУ условно разбит на два

регистра:  $QR_1$  и  $QR_2$ . Предполагается, что длина  $L_1$  регистра  $QR_1$  равна длине  $L_2$  регистра  $QR_2$ . Регистры  $QR_1$  и  $QR_2$  построены из одинакового числа  $\tilde{\lambda}$  куэнков:  $\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}_1 = \tilde{\lambda}_2$ .

Упомянем о критериях Ди Винченцо [46]. Их можно называть постулатами квантового компьютеростроения. Они приведены во всех монографиях [18—20, 37] и статьях (см., например, [1]), посвящённых КК и квантовым вычислениям. Предполагается, что для нашего КвУ (в ИПУ РАН теоритически обоснован и разрабатывается проблемно-ориентированный КК) выполняются все постулаты Ди Винченцо (в данной работе они не приводятся).

Блок настройки и коммутации помогает классическому компьютеру управлять реализацией операций с использованием квантовых вентилей, в частности операций, реализуемых квантовыми блоками пересечения  $QB_\zeta$  над разными куэнками [15, 16, 33]. Описание схем фильтрации и пролиферации при использовании QD-алгоритмов приведено в [27, 29—32]. Регистр  $QR_2$  на рис. 3 изображён дважды, так как результат вычислений помещён в  $QR_2$ . Каждый блок  $QB_\zeta$  реализует унитарную блочно-диагональную матрицу Рота  $U_{R,B-D,v}$ . Подматрицей матрицы  $U_{R,B-D,v}$  служит унитарная матрица Рота  $U_{R_2}^\dagger$ , реализующая элементарную операцию  $\alpha_j$ . Операция  $\alpha_j$  является основной операцией классического и матричного исчисления кубических комплексов, а также классических и квантовых D-алгоритмов [33]. КГТ-2 служит моделью вычислений для рассматриваемого КвУ.

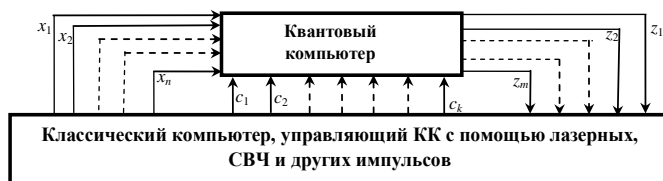


Рис. 2. Схема соединения КК и управляющего им классического компьютера

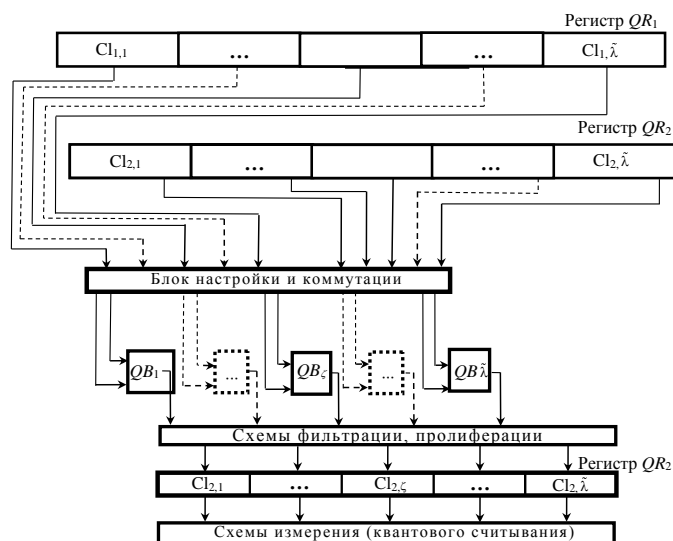


Рис. 3. Вычислительная модель КвУ в виде схемы КГТ-2



После измерения квантовая информация превращается в классическую [18, 37]. Другими словами, результат вычислений получается после измерения в виде классической информации. Целесообразно повторить, что с позиций КМ число  $\nu$  больше любого наперёд заданного числа  $\tilde{N}$ , однако практически достижимым для простых кунитов является число  $\nu \approx 10^7$ , тогда как для куэнка при  $\alpha = \hat{n} = 50$  (согласно опыту IBM) практически достижимым является число  $\nu = 2^{50} \approx 1,12 \cdot 10^{15}$ .

Сравним два регистра,  $QR_a$  и  $QR_b$ , у которых  $L_a = L_b$ . Регистр  $QR_a$  построен из простых кунитов  $k_{1,\ell}$ , а  $QR_b$  — из куэнков  $Cl_{b,\zeta}$  ( $\hat{n} \geq 2$ ). Предположим, что для кунита  $k_{a,\ell}$  и куэнка  $Cl_{b,\zeta}$  размерность  $\nu$  одинакова и при этом  $\nu > 2$ . Пусть реальный физический объём кунита  $q_{a,\ell} \in QR_a$  равен реальному физическому объёму кубита  $q_{b,\zeta,c} \in Cl_{b,\zeta}$ . Известно, что в "гильбертовом пространстве много места" [37]. Следовательно, реальный физический объём  $V_a$  регистра  $QR_a$  всегда меньше, чем реальный физический объём  $V_b$  регистра  $QR_b$ . В этом свойстве регистра  $QR_a$ , построенного из простых кунитов, состоит главное преимущество их использования: чем больше при одном и том же числе  $L$  размерность  $\nu$  гильбертова пространства  $\mathcal{H}_{a,\ell}$  кунита  $k_{a,\ell}$ , тем меньше объём  $V_a$  регистра  $QR_a$ .

В одной из следующих работ предполагается привести пример решения булевых уравнений на платформе КГТ-2 с использованием QD-алгоритмов.

### Заключение

Существуют скептики, считающие, что КК не появятся в обозримом будущем, а большие КК, у которых регистр содержит 1000 запутанных кубитов, не появятся никогда [47]. Напомним, что история ВТ хранит высказывания подобных скептиков о классических компьютерах ещё со времён появления первого компьютера ЭНИАК (Electronic Numerical Integrator and Computer — ENIAC). Эти высказывания были опровергнуты эволюцией компьютеров в соответствии с законом Мура. Напротив, те, кто реально занимается разработкой КК и уже разработал КК, утверждают, что пришло время перестать задавать вопрос, возможен ли КК, и начать фокусировать деятельность на разработке его крупномасштабной архитектуры и на том, что он способен делать [40]. Они пытаются создать модульный КК, так как подход, основанный на грубой силе, т. е. на постоянном добавлении запутанных кубитов к регистру КК, по их мнению, обречён на неудачу [1].

### Литература

1. *Правильщиков П. А.* Закат кремниевых технологий и квантовая революция в вычислительной технике: доклад в тр. XIII Всеросс. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2019). Россия, Москва, ИПУ РАН, 17–20 июня

2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://vspu2019.ipu.ru/files/vspu/Доклады%20ВСПУ-2019/18%20У%20МКЗ/ПравильщиковПА.pdf>

2. *Кокин А. А.* Исследования моделей полномасштабных квантовых компьютеров на ядерных спинах в ФТИАН // Труды Физико-технологического института: Квантовые компьютеры, микро и наноэлектроника. Физика, технология, диагностика, моделирование / под ред. А. А. Орликовского. — М.: Наука, Т. 23. 2013. С. 19–55.

3. Новые техпроцессы для производства микросхем все чаще откладываются — почему? [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/it-grad/blog/422501/>

4. Компания IBM представила первый в мире 5-нанометровый чип [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/it-grad/blog/330304/>

5. *Детинич Г.* IBM анонсировала первый квантовый компьютер, который можно поставить дома [Электронный ресурс]. URL: <https://3dnews.ru/980890>

6. *Александров Д.* Революция в IT: начало конца кремниевой электроники [Электронный ресурс]. URL: <https://republic.ru/posts/20800>

7. *Макаров В.* Нитрид галлия превзошел кремний: нас ждет новая эра технологий [Электронный ресурс]. URL: [https://www.popmech.ru/science/464042-nitrid-galliya-prevzoshel-kremniy-nas-zhdet-novaya-era-tehnologii/?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com](https://www.popmech.ru/science/464042-nitrid-galliya-prevzoshel-kremniy-nas-zhdet-novaya-era-tehnologii/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com)

8. *Jones B.* Google Just Unveiled The World's Most Advanced Quantum Processor by Far [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencealert.com/google-bristleccone-quantum-computing-72-qubits-chip>

9. Шаг к квантовому превосходству: 49-кубитный квантовый компьютер от Intel [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/it-grad/blog/347044/> (дата обращения: 27.08.2018).

10. *Hsu J.* Flip-Flop Qubit Could Make Silicon the King of Quantum Computing [Электронный ресурс]. URL: <https://spectrum.ieee.org/nanoclast/computing/hardware/flipflop-qubit-could-make-silicon-king-the-of-quantum-computing>

11. TechCrunch: D-Wave announces its next-gen quantum computing platform [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dwavesys.com/media-coverage/techcrunch-d-wave-announces-its-next-gen-quantum-computing-platform>

12. *Правильщиков П. А.* Квантовый параллелизм и новая модель вычислений: тр. 12-го Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). — М.: Институт проблем управления им. Трапезникова РАН, 2014. С. 7319–7334.

13. *Правильщиков П. А.* Новый механизм квантового параллелизма и его физические и математические основания // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4. С. 15–26.

14. *Правильщиков П. А.* Необходимость и обоснование нового механизма квантового параллелизма: тр. 17-й Межд. конф. "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта" (CAD/CAM/PDM-2017). — М.: Институт проблем управления РАН им. Трапезникова, 2017. С. 78–82.

15. *Правильщиков П. А.* Простые и сложные (составные) куниты в регистре квантового компьютера: тр. 18-й Межд. молодёжной конф. "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта" (CAD/CAM/PDM-2018). — М.: ИПУ РАН, 2018. С. 17. <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2018/0/4.pdf>

16. *Правильщиков П. А., Васильева Т. М.* Новая модель вычислений — КГТ-2: тр. XIII Всеросс. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2019). — М.: ИПУ РАН, 2019. <https://vspu2019.ipu.ru/files/vspu/Доклады%20ВСПУ-2019/18%20У%20МКЗ/ПравильщиковПА2.pdf>

17. *Дойч Д.* Структура реальности. (The Fabric of Reality). — Москва-Ижевск, РХД. 2001.

18. *Прескилл Дж.* Квантовая информация и квантовые вычисления. — Москва-Ижевск: ИКИ (НИИ Регулярная и хаотическая динамика), 2008. Т. 1. С. 30.

19. *Кае Ф., Лафлам Р., Москва М.* Введение в квантовые вычисления. — Москва-Ижевск: НИИ "Регулярная и хаотическая динамика", Институт компьютерных исследований, 2009. — 360 с.

- [illegible]

## A QUANTUM REVOLUTION IN COMPUTING AND NEW COMPUTING MODELS

P. A. Pravilshchikov

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

*The causes of the quantum revolution and the decline of silicon technologies are briefly described. Two schemes of new computational models for modular problem-oriented quantum computers (QC) are presented and is described the second model of the quantum generator of tests (QGT-2), which uses the mechanism of hyper mass parallelism, adjusted to the implementation of quantum D-algorithms (QD-algorithms). It is shown that the register must be built on complex qudits — quencks to create reliable QC. It is demonstrated that modular QC and their model in the form of KGT-2 can overcome the problems with the use of a large number of L ( $L > 50$ ) entangle qubits in the development of QC. On the on the basis KGT-2 the solution of NP-complete problems time complexity remains polynomial.*

**Keywords:** modular quantum computers, quantum accelerator, quantum parallelism, qubits, qutrits, quqvadrits, qudits, quancks, computational models.

**Правильщиков Павел Алексеевич**, ведущий научный сотрудник.  
E-mail: pavelp@ipu.ru

*Статья поступила в редакцию 17 ноября 2019 г.*

УДК 658.3

## SADT-ТЕХНОЛОГИЯ В ПОСТРОЕНИИ IDEF-ДИАГРАММ В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В. А. Прудников, канд. техн. наук

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

*Приводится методика анализа формирования схем функционирования процессов моделирования построения баз данных в информационных системах.*

**Ключевые слова:** SADT-методология, IDEF-диаграммы, представление диаграмм данных и процессов.

Технологические процессы широко применяются программирование средств информационной поддержки реализуемых решений. Развитие автоматизированных систем имеет длительную историю, представляя новую самостоятельную деятельность во многих странах. Информационные системы (ИС) под управлением операторов, использующих автоматизированные системы, выступают одновременно партнерами, помощниками и конкурентами производств разных целевых назначений, способствуют сокращению сроков исполнения рутинных видов работ, обеспечению улучшенных показателей качества создаваемой продукции, услуг, технических решений [1].

В опубликованных учебниках, статьях журналов, на страницах в Интернете, посвященных возникновению, реализации идеи формирования и эксплуатирования ИС в практических приложениях, структурированные сведения представлены недостаточно широко. Между тем спецкурсы на эти темы уже читаются во многих высших учебных заведениях и считаются тематикой актуальной и востребованной [2]. Собранный из разных источников материал о методологиях SADT отличает от других рекомендаций по использованию систем информационной поддержки логическая целостность и полнота.

### Общие сведения о ИС

ИС создаются в процессах реализации практических проектов, являются составной частью автоматизированных систем целевого назначения [3, 4] и частью автоматизированных систем. Рассмотрим направление, показывающее способы создания ИС, использующее методологию SADT для построения групп диаграмм IDEF. Для создания диаграмм IDEF в SADT-методологии так же, как и в проектах “в целом”, характерны этапы их создания, реализации и использования.

*Общее определение проектов* подразумевает целенаправленное создание и изменение некоторых систем с определенными заранее целями и критериями, с фиксированными требованиями к срокам, затратам и привлеченным ресурсам.

Проекты предусматривают наглядность, наблюдаемость, допускают возможность контроля хода их выполнения и управляемости в сочетании с возможностями воздействия на ход их реализации.

Базовым понятием методологии проектирования ИС считают жизненный цикл (ЖЦ) изделия [5]. В узком смысле — это процесс, начинающийся в момент принятия решения о создании ИС и заканчивающийся при изъятии системы из эксплуатации.

Методология поддержана международными нормативами по стандартизации. Стандарт ISO/IEC 12207 был опубликован в 1995 г. и явился первым международным стандартом, содержащим представительный набор процессов описания ЖЦ производств, включающих действия по решению задач и создание программного обеспечения (ПО). В ISO/IEC 12207 структура жизненного цикла ПО базирована на трех группах процессов, показанных на рис. 1 [6].



**Рис. 1. Структура определения групп процессов жизненного цикла проекта для IDEF-моделирования**

В периодических сообщениях новостных лент Интернета поисковые машины обнаруживают сведения специальной направленности о появлении и развитии новых информационно-коммуникационных систем для различных областей гражданского применения, имеющих межгосударственную организационную поддержку [7]. Например, за стандартом ISO/IEC 12207 в ноябре 2002 г. опубликован более общий стандарт ISO/IEC 15288.

**Системотехника.****Процессы жизненного цикла системы**

ISO/IEC 15288 отличается от ISO/IEC 12207 определением программно-аппаратных систем в целом. В ISO/IEC 15288 предусмотрена похожая схема рассмотрения жизненного цикла системы в виде набора процессов. Каждый процесс описывает набор результатов различных видов деятельности.

Всего выделено 26 процессов, объединенных в 5 групп:

- выработка соглашений (приобретение или поставки системы);
- уровень организации (управление окружением, инвестициями, процессами, ресурсами, качеством);
- уровень проекта (планирование, оценивание, мониторинг, управление рисками, конфигурацией, информацией, выработка решений);
- технические процессы (подразумевают определение требований, их анализ, проектирование архитектуры, реализацию, интеграцию, верификацию, валидацию, передачу в использование, эксплуатацию, поддержку, изъятие из эксплуатации);
- специальные процессы (осуществляют адаптацию описываемых стандартом процессов конкретных проектов).

В перечисленных процессах подтверждено 123 различных результата и 208 видов деятельности, нацеленных на достижение технологических результатов.

В дополнениях к стандарту ISO/IEC 12207 введены дополнительно определения: цель процесса, его результат (выходы), определена эталонная модель процесса, отвечающая требованиям стандарта ISO/IEC 15504-2. (Информационная технология "ОЦЕНКА ПРОЦЕССА". Ч. 2. Проведение оценки.)

Международный стандарт ISO/IEC 12207:2008 представляет собой уже переработанные и исправленные дополнения к стандарту ISO/IEC 12207. Он является первым шагом по гармонизации спецификаций, цель которых создание полностью интегрированного набора процессов ЖЦ систем и программных средств, руководства по их применению. Это направление создано еще в 1946 г. двадцатью пятью национальными организациями по стандартизации. СССР входил в их число как один из основателей организации и постоянный член руководящих органов. Сфера деятельности ISO касается стандартизации во всех областях, кроме электротехники и электроники, относящихся к компетенции Международной электротехнической комиссии (МЭК). Часть работ выполнена совместными усилиями этих организаций. Кроме стандартизации по ISO, они также занимаются проблемами сертификации.

В 2005 г. Российская Федерация вошла в Совет организаций, внедряющих стандарты ISO как обязательные. В этот состав входит 163 страны. Штаб-квартира организации находится в Женеве (Швейцария). Россия представлена в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии в качестве комитета-члена ISO. Всего в составе ISO более 80 комитетов-членов. Кроме комитетов-членов, членство в ISO может иметь статус членов-корреспондентов, которыми являются организации по стандартизации развивающихся государств. Категория член-абонент введена дополнительно для развивающихся стран. Комитеты-члены имеют право принимать участие в работе технических комитетов ISO, голосовать по проектам стандартов, избираться в состав Совета ISO и быть представленными на заседаниях Генеральной ассамблеи. Члены-корреспонденты (их 25) не ведут активной работы в ISO, но имеют право на получение информации о разрабатываемых стандартах. Члены-абоненты платят льготные взносы и имеют возможность находиться в курсе дел по международной стандартизации. ИЕС — международная некоммерческая организация по стандартизации в области электрических, электронных и смежных технологий. Некоторые из стандартов МЭК разрабатываются совместно с Международной организацией по стандартизации (ISO). МЭК составлена из представителей национальных служб стандартов, основана в 1906 г. В ее состав входит более 76 стран. Еще в 1948 г. штаб-квартира МЭК была размещена в Женеве (Швейцария).

Еще до появления международного стандарта ISO/IEC 12207 в Советском Союзе существовал комплекс стандартов на информационные технологии ГОСТ 34 [8—11]:

- ГОСТ 34.201-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы (АС). Виды, комплектность и обозначение документов при создании АС;
- ГОСТ 34.602-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на АС. Техническое задание на создание АС;
- ГОСТ 34.603-92 Информационная технология. Виды испытаний АС;
- ГОСТ 34.320-96 Информационные технологии. Система стандартов по базам данных. Концепция и терминология для концептуальной схемы и информационной базы;
- ГОСТ 34.321-96 Информационные технологии. Система стандартов по базам данных. Эталонная модель управления данными;
- ГОСТ 34.601-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на АС. Автоматизированные системы (АС). Стадии создания.

Объектами стандартизации определены АС различных типов и все виды их компонентов. Стандарт устанавливал стадии и этапы создания АС.

### Модели жизненного цикла производств

Различные модели ЖЦ производств отражают одновременно специфику условий, для которых она создана, и особенности самих ИС [11]. Модели считают состоящими из некоторого количества этапов и взаимосвязей между ними. Количество и названия этапов в разных моделях могут различаться, но в любом случае соответствуют фазам развития ИС. Основными типами моделей являются две: каскадная и спиральная модели (рис. 2 и 3).

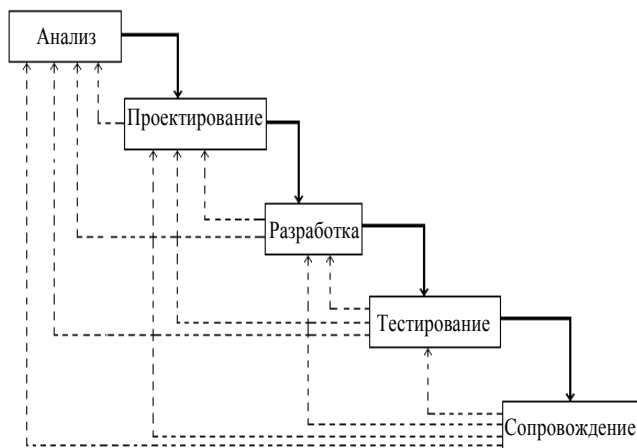


Рис. 2. Каскадная модель ИС, отражающая жизненный цикл процесса машиностроительного производства и эксплуатации

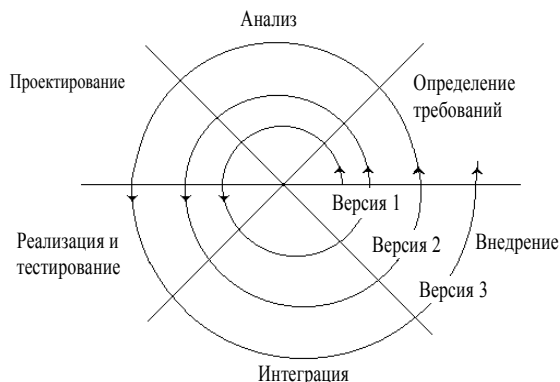


Рис. 3. Спиральная модель процесса

Каскадная модель отражает разбиение процесса на последовательные этапы, причем переход от одного этапа на следующий происходит только после завершения работы предыдущего этапа.

Положительными сторонами каскадного моделирования считают формирование законченности каждого этапа набором проектной документации, отвечающей критериям полноты и согласованности. Выполняемые в логической последовательности они позволяют планировать сроки завершения каждой работы, оценивать и обеспечивать сопутствующие затраты.

Недостатки этой модели проявились при апробациях и были обусловлены тем, что реальный процесс создания ИС никогда полностью не укладывается в строгую схему, напри-

мер, часты возникновения запаздываний с получением результатов. Недостатком считают то, что согласование результатов с пользователями производится только в заранее спланированных точках, после завершения каждого этапа работ, а сами требования к ИС "заморожены" в виде технических заданий на все время их создания.

В процессах работ с ИС возникают потребности в возврате к предыдущим этапам и уточнениям или пересмотрам решений, принятых ранее. Это приводит к межэтапным корректировкам, удлинению периодов изготовления изделий и продукции, но повышает надежность, модель "обращается" вариантами исполнения и иными уточнениями.

Названные проблемы сглаживает *спиральная модель ЖЦ*. Она ориентирована на активную работу с пользователями и представляет ИС как постоянно корректируемую во время разработки.

В спиральной модели существенно определение начальных этапов ЖЦ: анализ и проектирование. На этих этапах реализуемость технических решений проверяется путем наличия и создания прототипов. Каждый виток спирали соответствует созданию фрагмента или версии конкретной ИС, на нем уточняются цели и характеристики проекта, определяется его качество и планируются работы следующего витка спирали.

В качестве преимуществ спиральной модели отмечают:

- упрощение изменений проекта при изменении требований заказчика;
- интеграцию отдельных элементов ИС в единое целое, происходящую постепенно;
- уменьшение уровня проблем и их последствий, так как их обнаружение происходит во время интеграции;
- получение более надежной и устойчивой системы, так как ее совершенствование происходит на каждой итерации.

Например, в иллюстрациях работы ИС, поясняющих совместную работу доменных систем, в качестве иллюстрации работы ИС доменной конфигурации приводят схему, показанную на рис. 4 (аббревиатуры CAD, CAM, CAE и другие обозначают подсистемы и применяются инженерами в машиностроительной практике, поэтому даны без раскрытия сокращения и перевода).

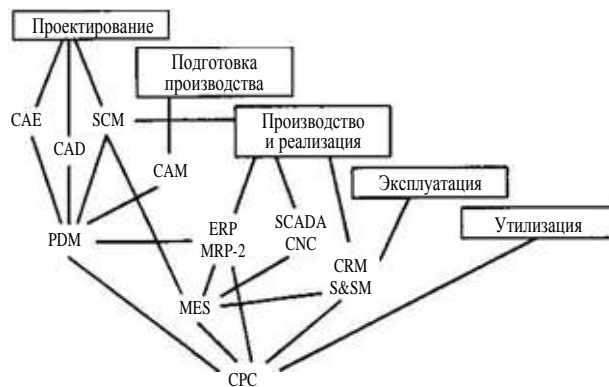


Рис. 4. Этапы жизненного цикла промышленных изделий и используемые АС



Конфигурирование этих подсистем более сложно, чем в классических представлениях проектирования ИС [12—14]. Они представлены шире, чем схемы задания реляционных связей, например, через схемы "звезды и снежинки". В такой схеме заметно сходство с каскадной моделью ИС.

Методология SADT (*Structured Analysis and Design Technique*) — наиболее известная методика структурно-функционального моделирования сложных систем — была объявлена в 1973 г. Дугласом Россом (D. Ross). Она представляет собой совокупность методов, правил и процедур, предназначенных для построения функциональной модели системы. Сама функциональная модель отражает производимые системой действия и связи между ними.

Для понимания логики проектирования ИС некоторые термины этого метода требуют специального пояснения. SADT считается методологией, основными элементами которой являются концепции:

- последовательной функциональной декомпозиции;
- графического представления блочного моделирования.

Графика блоков и дуг SADT-диаграмм отображает функцию в виде блока, а интерфейсы входа/выхода представляются дугами, соответственно, входящими в блок и выходящими из него (рис. 5).

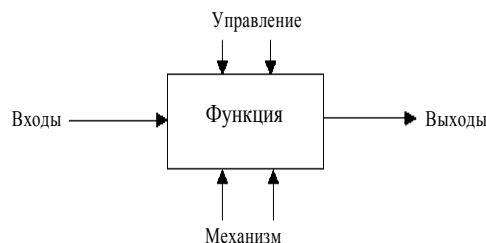


Рис. 5. Основной блок в диаграммах IDEF

При этом:

- управляющая информация входит в блок сверху;
- исходные данные (вход), которые подвергаются обработке, показаны с левой стороны блока;
- результаты обработки (выход) показаны с правой стороны блока;
- механизм (человек или программа), который осуществляет операцию, представлен дугой, входящей в блок снизу.

Правила построения SADT-диаграмм следующие:

- ограничение количества блоков на каждом уровне декомпозиции (правило 3—6 блоков);
- связность диаграмм (номера блоков);
- уникальность меток и наименований (отсутствие повторяющихся имен);
- синтаксические правила для графики (блоков и дуг);

- разделение входов и управлений (правило определения роли данных);

- отделение организации от функции (исключение влияния организационной структуры на функциональную модель).

Построение SADT-модели начинается с представления системы в виде контекстной диаграммы. Контекстная диаграмма представляет самое общее описание системы и ее внешних взаимодействий, имеет вид одного блока и дуг, изображающих набор внешних воздействий. Затем проводится разбиение системы на фрагменты (функциональная декомпозиция). Декомпозиция выявляет полный набор подфункций, каждая из которых показана как блок и стрелки. Получаемые диаграммы называются диаграммами декомпозиции ИС (рис. 6).

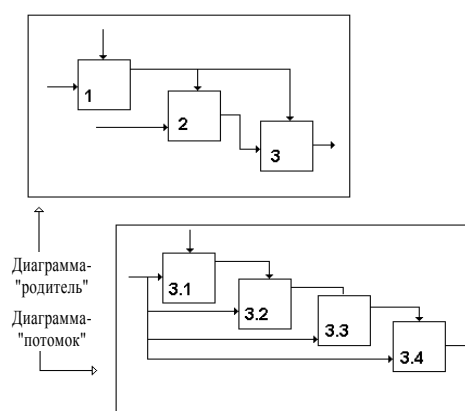


Рис. 6. Схема декомпозиции моделируемого процесса

Модели SADT представляют собой серию диаграмм, обеспеченных сопроводительной документацией, разбивающих создание сложного объекта на составные части. Каждая детальная диаграмма является декомпозицией более общего блока. На каждом шаге декомпозиции выступает более общая диаграмма (она называется родительской) для диаграммы более детальной.

Результатом применения методологии SADT является модель, состоящая из диаграмм, фрагментов текста и словаря, имеющих ссылки друг на друга. При этом создается программное решение, описывающее конкретный процесс, иллюстрируемый диаграммами, показывающими связи и работу программируемых моделей.

Диаграммы потоков данных DFD (*Data Flow Diagrams*) — инструмент построения, который также относится к методам структурного анализа, использует понятия "процесс", "поток данных" и "хранилище данных" для описания систем в виде наборов диаграмм, отражающих и структурирующих назначение проектируемой системы. Требования к такой системе разбиваются на функциональные компоненты (процессы) и представляются в виде сетей процессов, связанных потоками данных. Авторы упоминают при описании диаграмм потоков данных Гана и Сарсона (Gane and Sarson 1979).

Диаграммы верхних уровней иерархий (контекстные диаграммы) определяют основные процессы или подсистемы ИС с внешними входами и выходами. Их детализируют диаграммы нижнего уровня. Такая декомпозиция продолжается, создавая многоуровневую иерархию диаграмм, до тех пор, пока не будет достигнут уровень декомпозиции, на котором процессы становятся элементарными и детализировать их далее невозможно.

Источниками информации являются *внешние сущности*. Их порождают информационные потоки (*потоки данных*), приносящие информацию к *подсистемам* или *процессам*. Те преобразуют информацию и порождают новые потоки, которые передают данные к другим процессам или подсистемам, *накопителям* и *внешним сущностям* — потребителям информации.

*Внешняя сущность* подразумевает материальный предмет и физическое лицо, являющееся источником или приемником информации (например, заказчики, персонал, поставщики, клиенты, склад). Определение объекта или системы в качестве внешней сущности указывает на то, что она находится за пределами границ проектируемой ИС.

*Процесс* представляет собой преобразование входных потоков данных в выходные в соответствии с определенным алгоритмом или правилом. Физически процессы могут быть различными: это может быть подразделение организации, выполняющее обработку входных документов и выпускающее отчеты, программа или программы, аппаратно реализованное логическое устройство и т. д.

*Накопитель* данных представляет собой устройство для хранения информации (сервер или сборка серверов), которую можно в любой момент поместить в накопитель и через некоторое время извлечь, причем способы помещения и извлечения могут быть различными. Накопитель данных может быть реализован физически в виде ящика в картотеке, таблицы в оперативной памяти, файла на магнитном носителе и т. п.

*Поток данных* создается механизмом передачи информации через некоторое соединение от источника к приемнику (от одной части системы в другую). Реальный поток данных порождает информацию, передаваемую устройствами, как правило, по кабелю или, например, по почте письмами, передаваемыми физически магнитными лентами или дискетами, обрабатываемыми после специальной передачи информационных потоков на них, а затем на компьютеры.

*Словарь данных системы* это часть модели ИС, использующей DFD. Словарь представляет собой специфические определения, используемые для понимания входных и выходных потоков и компонентов накопителей. Для потоков данных в *словаре данных конкретной системы* хранятся имя потока, его тип и атрибуты.

Первым шагом при построении иерархий DFD-диаграмм является построение контекст-

ных диаграмм. Для каждой подсистемы, присутствующей на контекстных диаграммах, выполняют ее детализацию при помощи DFD. Каждый процесс на DFD детализируют при помощи DFD или мини-спецификации.

*Мини-спецификация* (описание логики процесса, алгоритма преобразования данных) представляет собой текст небольшого объема (псевдокод), позволяющий в дальнейшем реализовать процесс в виде модуля или процедуры. Мини-спецификация является конечной вершиной иерархии DFD.

Еще один тип диаграмм — *модель сущность—связь* (erd).

ERD (*Entity-Relationship Diagrams*) — средство моделирования для построения концептуальной схемы базы данных в форме одной модели или нескольких локальных, которые относительно легко отображаемы в произвольную систему баз данных. Идея модели и нотации ERD была предложена Питером Ченом (P. Chen) в 1976 г. В дальнейшем она развивалась в работах Ричарда Баркера. Описание предметной области включает существующие в ней объекты, их свойства и отношения. Модель сущность—связь строится с использованием трех конструктивных элементов: *сущность*, *атрибут* и *связь*.

*Сущность* (*Entity*) — это определение (часто модельное) реально существующего либо воображаемого объекта, процесса или явления, имеющего существенное значение для рассматриваемой предметной области, информация о котором подлежит хранению. С понятием сущности связаны понятия *тип* (набор однородных предметов, явлений, выступающий как единое целое) и *экземпляр* (конкретный элемент набора, определяющего некоторый тип). Каждая сущность обладает уникальным идентификатором. Экземпляр сущности однозначно идентифицируется и отличается от всех других экземпляров данного типа сущностей.

Различают сущности *независимые*, *зависимые* и *ассоциированные*.

*Независимая сущность* представляет данные, которые всегда присутствуют в системе.

*Зависимая сущность* представляет данные, зависящие от других сущностей в системе. Для существования зависимой сущности необходимо наличие сущностей, от которых она зависит.

*Ассоциированная сущность* представляет данные, которые связаны с отношением между сущностями.

*Атрибут* (*attribute*) — именованная характеристика сущности, являющаяся средством для описания ее свойств, значимых для рассматриваемой предметной области. Атрибут предназначен для квалификации, идентификации, классификации, количественной характеристики или выражения состояния сущности. Атрибутом является тип характеристик или свойств. Экземпляр атрибута определяется типом характеристики и ее значением, называемым значе-

нием атрибута. Атрибут может быть *обязательным* либо *необязательным*. Обязательность означает, что атрибут не может принимать неопределенных значений.

Для идентификации конкретных экземпляров сущностей, принадлежащих некоторому типу, используют специальные *атрибуты или наборы атрибутов, называемые ключом*. Каждая сущность обладает хотя бы одним возможным ключом.

*Возможный ключ сущности* — один или несколько атрибутов, чьи значения однозначно определяют каждый экземпляр сущности. При существовании нескольких возможных ключей один из них выбирается в качестве *первичного ключа*, а остальные рассматриваются как *ключи альтернативные*.

*Связь (Relationship)* — средство представления отношений между сущностями, значимых для рассматриваемой предметной области. Каждая сущность может обладать любым количеством связей с другими сущностями модели. Семантически отношения могут объединять произвольное количество сущностей, но в ERD-модели используют только бинарные связи, которыми моделируют любые *n*-арные отношения. Связи между сущностями представляют собой моделирующие отношения, которые существуют, пока существуют соединяемые ими объекты. Они называются *неограниченными* (обязательными). *Ограниченная* (необязательная) связь моделирует *условные* отношения между объектами. Бинарные связи (попарно объединяющие сущности) классифицируют по типу отношения между экземплярами сущностей следующим образом:

- связь один-к-одному (1 : 1): каждому экземпляру сущности А соответствует один экземпляр сущности В, и наоборот (пример: водитель—права);
- связь один-ко-многим (1 : M): одному экземпляру сущности А соответствует несколько экземпляров сущности В, а каждому экземпляру сущности В соответствует один экземпляр сущности А (пример: права—тип управляемого автомобиля);
- связь многие-к-одному (M : 1): обратная по отношению к связи один-ко-многим (пример: пропуск—владелец);
- связь многие-ко-многим (M : N): каждому экземпляру сущности А соответствует несколько экземпляров сущности В, и наоборот (пример: пропуск—профессия).

Такие связи используют в специальных изображениях ER-диаграмм и называют "нотации Чена" для специальных обозначений графических примитивов.

Еще одним типом диаграмм является диаграмма переходов состояний STD (*State Transition Diagrams*) (рис. 7). Ее используют для моделирования поведения систем, зависящих от времени, и определения их реакций на

некоторые события. STD-диаграммы создают, используя:

- Состояние (моделируемая система в любой заданный момент времени должна находиться точно в одном из конечного множества состояний).
- Начальное состояние (является стартовой точкой для начального этапа применения системного перехода, соответствующего состоянию после инсталляции; STD имеют лишь одно начальное состояние, но любое (конечное) число завершающих состояний).
- Переход определяет перемещение моделируемой системы из одного состояния в другое. При этом имя перехода идентифицирует событие, являющееся причиной перехода и управляющее им. Это событие состоит из управляющего потока (сигнала), возникающего как во внешнем мире, так и внутри системы при выполнении некоторого условия.
- Действие — это операция, которая связана с переходом и осуществляется при выполнении перехода.



Рис. 7. Пример STD-диаграммы

В диаграммах STD состояния представляют узлами, на переходы указывают дуги. Условия идентифицируются именем перехода и возбуждают выполнение перехода. Действия или отклики на события привязаны к переходам и записываются соответствующими условиями. Начальное состояние на диаграмме имеет входной переход, изображаемый потоком от стартового узла.

В описаниях построения диаграмм встречаются два способа построения STD. Первый способ заключается в идентификации возможных состояний и дальнейшем исследовании всех существенных связей (переходов) между ними. По второму способу сначала строят начальное состояние, затем следующие за ним и т. д.

В ситуации, когда число состояний и/или переходов велико, для проектирования спецификаций управления используют, например, матрицы переходов состояний. В матрице переходов по вертикали указывают состояния, из которых осуществляется переход, по горизонтали — состояния, в которые осуществляется переход. При этом элемент матрицы содержит соответствующие условия и действия, обеспечивающие переход из "вертикального" состояния в "горизонтальное".

### Методики проектирования IDEF-диаграмм

Развитие методов и моделей проектирования ИС приводит к необходимости создания системы методик концептуального проектирования, которые обеспечат возможность эффективного обмена информацией между всеми специалистами-участниками процесса [15].

Совокупность методик уже разработана в США по программе компьютеризации промышленности ICAM (*Integrated Computer-Aided Manufacturing*). Она получила название IDEF (от *IcamDEFinition* или *IntegratedDEFinition*). Назначение примененных в программе диаграмм приведено в таблице.

Назначение примененных в IDEF-диаграмм

Название	Назначение
IDEF0	Функциональное моделирование (Function Modeling Method)
IDEF1 и IDEF1X	Информационное моделирование (Information and Data Modeling Methods)
IDEF2	Поведенческое моделирование (Simulation Modeling Method)
IDEF3	Моделирование процессов (Process Flow and Object State Description Capture Method)
IDEF4	Объектно-ориентированное проектирование (Object-Oriented Design Method)
IDEF5	Систематизация объектов приложения (Ontology Description Capture Method)
IDEF6	Использование рационального опыта проектирования (Design Rationale Capture Method)
IDEF8	Взаимодействие человека и системы (Human—System Interaction Design)
IDEF9	Учет условий и ограничений (Business Constraint Discovery)
IDEF14	Моделирование вычислительных сетей (Network Design)

Основными диаграммами в методиках функционального моделирования бизнес-процессов считаются IDEF0, методология информационного моделирования IDEF1X и методология документирования технологических процессов IDEF3, дополненная технологией анализа потоков данных DFD.

Методика IDEF0 основана на методологии SADT и является начальным этапом построения ИС. IDEF0 предназначена для функционального моделирования путем создания описательной графической модели, показывающей, что, как и кем делается в рамках функционирования

предприятия. Госстандартом России приняты рекомендации по стандартизации Р50.1.028-2001 "Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования". Они описывают язык моделирования IDEF0, правила и методику структурированного графического представления для описания процессов (бизнес-процессов) предприятий и организаций.

IDEF0 применяется для построения двух видов моделей.

В первоначальном обследовании предприятий строится функциональная модель *как есть*, которая позволяет четко определять деловые процессы предприятий, информационные объекты, используемые при выполнении деловых процессов и отдельных этапов работ.

Функциональная модель "как есть" является отправной точкой для анализа потребностей предприятия, выявления проблем, "узких" мест проекта в предполагаемом совершенствовании деловых процессов.

Создание и внедрение корпоративной информационной системы приводит к изменению условий выполнения операций, структуры деловых процессов и предприятий в целом. Функциональная модель *как будет* (или *как должно быть*) позволяет уже на начальной стадии проектирования будущей информационной системы определить ее изменения (рис. 8). Применение функциональной модели "как будет" позволяет не только сократить сроки внедрения информационной системы, но и снизить риски, связанные с невосприимчивостью персонала к новым информационным технологиям.

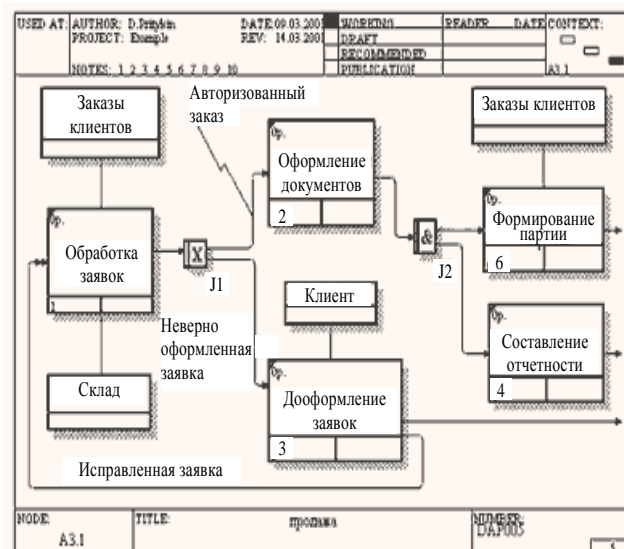


Рис. 8. Пример диаграммы IDEF для планируемой ИС "как должно быть"

Методика IDEF1 разработана как инструмент анализа и изучения взаимосвязей между информационными потоками внутри системы и построения наглядной модели информационной структуры объекта. Основой для разработки

IDEF1 послужили методики информационного моделирования баз данных в виде диаграмм сущность—связь.

*Методика IDEF1X.* Этот метод определения реляционных баз данных использует условный синтаксис, разработанный специально для удобного построения схемы БД. Методики IDEF1X наиболее целесообразны для построений логической структуры базы данных после того, как все информационные ресурсы исследованы (например, с помощью метода IDEF1) и решение о внедрении реляционной базы данных как части корпоративной информационной системы принято.

*Методика формирования IDEF3* является методикой описания процессов как упорядоченной последовательности событий с одновременным описанием объектов, имеющих отношение к этим процессам. Они, являясь средством документирования процессов технологических, происходящих на предприятиях, сами представляют неоднократные обобщения по ранее проведенным диаграммам.

Как и в других методиках IDEF, главной единицей представления модели IDEF3 являются диаграммы. Диаграммы оперируют такими элементами, как *действия*, *связи* (отношение между действиями), *соединения* (разворачивающее соединение возникает, когда завершение одного действия вызывает начало выполнения нескольких других действий и прекращение их выполнения в противоположной ситуации), *указатели* (ссылки на другие разделы описания процесса). Действия в случае необходимости допускают последовательную декомпозицию для детального анализа.

Возможны два типа диаграмм, отражаемых в IDEF3:

- описания последовательности этапов процесса (Process Flow Description Diagrams — PFDD);
- состояния и трансформаций объекта (Object State Transition Network — OSTN).

*Методика IDEF5* ориентирована на эффективное определение строения и свойств специализированной системы. Основной характерной чертой онтологического анализа является определение реального процесса через классы, определение их свойств и изменений. IDEF5 это структурированная методика, с помощью которой разрабатывают, поддерживают, документируют и изучают процесс. Средствами этого являются словарь терминов для описания характеристик объектов и процессов, имеющих отношение к системе (обычно применяют точные и однозначные определения терминов этого словаря) и классификации логических взаимосвязей между этими терминами.

Процесс построения онтологии согласно методологии IDEF5 состоит из пяти основных действий:

- изучение и систематизация начальных условий (устанавливает основные цели и кон-

тексты проекта разработки онтологии, распределяет роли между членами проекта);

- сбор и накопление данных;
- анализ данных (анализ и группировка собранных данных для облегчения построения терминологии);
- начальное развитие онтологии (формирование предварительной оценки на основе отобранных данных);
- уточнение и утверждение онтологии (заключительная стадия процесса).

Для построения диаграмм в IDEF5 применяются специальные языки: схематический язык Schematic Language-SL и язык доработок и уточнений Elaboration Language-EL.

IDEF-диаграммы представляют собой взаимосвязанную совокупность методик концептуального проектирования. Принципиальным требованием к ним считается возможность эффективного обмена информацией между специалистами-участниками разработки. Семейство IDEF — это технология создания проектов, охватывающих все стадии проектирования от первичного анализа до формы представлений окончательного проекта, через поэтапный процесс создания диаграмм и хранения версий.

*Унифицированный язык моделирования UML (Unified Modelling Language)* — это графический язык визуального представления, применяемый для составления спецификаций, проектирования и документирования проектирующих систем.

Базой создания UML явилось объединение методов объектно-ориентированного анализа с правилами проектирования сложных систем. В этом направлении уже развито несколько специальных методов построения решений:

- Буча (Booch'93), ориентированный на моделирование программного обеспечения сложных систем;
- Рамбо (OMT-2), ориентированный на анализ процессов обработки данных в информационных системах;
- Джекобсона (OOSE), ориентированный на анализ требований к бизнес-приложениям.

Авторы этих методов Гарди Буч (*G. Booch*), Джеймс Рамбо (*D. Rumbaugh*) и Айвар Джекобсон (*I. Jacobson*) объединились в целях создания унифицированного языка моделирования сложных систем, который был назван UML. В 1996 г. была создана первая версия языка UML 0.9. После этого фирмы Microsoft, IBM, Oracle и другие организовали консорциум UML, деятельность которого была обеспечена ежегодными взносами фирм-членов консорциума. Важную роль в создании языка UML сыграла его поддержка группой по управлению объектами OMG (Object Management Group), объединяющей около 300 ведущих компьютерных фирм. В 1997 г. были созданы версии языка UML 1.0 и 1.1. Формальная спецификация последней версии UML 2.0 опубликована в августе 2005 г.

UML 1.4.2 принят в качестве международного стандарта ISO/IEC 19501:2005.

Смысловые обозначения знаков языка идентичны определенным в этой работе:

- *Сущности* — абстракции, являющиеся основными элементами модели;
- *Отношения* связывают различные сущности;
- *Диаграммы* группируют представляющие интерес совокупности сущностей.

Пример разновидностей структурных сущностей приведен на рис. 9.



Рис. 9. Пример разновидностей структурных сущностей

Правила построения диаграмм и применяемые в обозначениях определения имеют постоянное развитие. Они представляются специфическими, но конкретными значениями.

**Класс (Class)** — описание совокупности объектов с общими атрибутами, операциями, отношениями и семантикой.

**Интерфейс (Interface)** — совокупность операций, которые определяют сервис (набор услуг), предоставляемый классу или компоненту. Интерфейс присоединяется к реализующему его классу или компоненту.

**Кооперация (Collaboration)** определяет взаимодействие. Она представляет собой совокупность ролей и других элементов, которые совместно производят некоторый кооперативный эффект, не сводящийся к простой сумме составляющих.

**Прецедент (Use case)** — это описание последовательности выполняемых системой действий, которая производит наблюдаемый результат, значимый для какого-то определенного актера (Actor).

**Компонент (Component)** — это физическая часть системы, которая соответствует некоторому набору интерфейсов и обеспечивает его реализацию. В системе можно встретить различные виды устанавливаемых компонентов, такие как COM+ или Java Beans, а также компоненты, являющиеся артефактами процесса разработки, например файлы исходного кода.

## Диаграммы

Выделяют ряд диаграмм по их содержанию.

**Диаграмма классов** показывает классы, интерфейсы, объекты и операции, а также их отношения. Диаграммы классов, которые включают активные классы, считают статическими.

**Диаграмма объектов** представляет собой описания объектов и отношений между ними. Они являются "фотографиями" экземпляров сущностей в диаграммах классов.

**Диаграмма прецедентов** представляет прецеденты и факты (частный случай классов), а также отношения между ними.

**Диаграммы взаимодействий** представляют связи между объектами, в частности сообщения, которыми объекты могут обмениваться. Диаграммы взаимодействий относят к динамическому виду системы. При этом *диаграммы последовательностей* отражают временную упорядоченность сообщений, а *диаграммы операций* — структурную организацию обмениваемых сообщениями объектов. Эти диаграммы являются изоморфными, т. е. могут быть преобразованы друг в друга.

**Диаграммы состояний** представляют состояния, переходы, события и виды действий. Диаграммы состояний относятся к динамическому виду системы. Особенно они важны при моделировании поведения интерфейса, класса или кооперации.

**Диаграмма деятельности** — это частный случай диаграммы состояний. На ней представлены переходы потока управления от одной деятельности к другой внутри системы.

**Диаграмма компонентов** представляет организацию совокупности компонентов и существующую между ними зависимость. Диаграммы компонентов относятся к статическому виду системы с точки зрения реализации.

**Диаграмма развертывания** представляет конфигурацию обрабатывающих узлов системы и размещенных в них компонентов. Диаграммы развертывания относятся к статическому виду архитектуры системы с точки зрения развертывания данных.

## CASE-системы.

### Примеры типовых программ и решений

CASE-системы (*Computer Aided Software/System Engineering*) понимают как устройства для автоматизированного проектирования программ/информационных систем. Это средства для дополнительного повышения эффективности разработки программного обеспечения. CASE-системы — инструментальные среды разработки ПО. В анализе и моделировании деятельности предприятий они позволяют осуществлять проектирование и перепроектирование (реинжиниринг) бизнес-процессов. Упоминаются как CASE-системы системы BPR (Business Process Reengineering). Их характеризуют некоторые общие признаки.



**Единый графический язык.** CASE-технологии обеспечивают объединение участников проекта, включая заказчиков, единым строгим, наглядным и интуитивно понятным графическим языком. Это позволяет заказчику участвовать в процессе разработки, разработчикам — общаться с экспертами в предметных областях, разделять, если требуется, деятельность системных аналитиков, проектировщиков и программистов.

**Единая БД проекта.** Использование БД отдельного проекта (репозитория) для хранения информации — основа в CASE-технологии. БД может разделяться между разработчиками, если требуется, в соответствии с их правами доступа. Содержимое репозитория включает не только информационные объекты различных типов, но и отношения между компонентами, а также правила использования и обработки этих компонент. Репозиторий хранит структурные диаграммы, определения окон и меню, проекты отчетов, описания данных, исходные коды, элементы данных и т. п.

**Поддержка коллективной разработки и управления проектами.** CASE-технологии поддерживают групповую работу над проектом, обеспечивая возможность работы в сети, экспорт/импорт фрагментов проекта для их развития и/или модификации, а также планирование, контроль, руководство и взаимодействие. В частности, через репозиторий осуществляют контроль безопасности (ограничения и привилегии доступа), контроль версий и их изменений и т. д.

**Макетирование.** CASE-технология создает возможность быстро строить макеты (прототипы) будущей системы, что позволяет заказчику на ранних этапах разработок оценить приемлемость решений.

**Генерация документации.** Документация по проекту генерируется автоматически на базе репозитория (достигая соответствия требованиям действующих стандартов). При этом документация отвечает текущему состоянию дел, быстро отражая изменения проекта.

**Верификация проекта.** CASE-технология обеспечивает автоматическую верификацию и контроль проектов за полнотой и состоятельностью на ранних этапах разработки, что положительно влияет на успех работ в целом.

**Автоматическая генерация объектного кода.** Генерация программ в машинном коде осуществляется на основе репозитория и позволяет автоматически строить до 85—90 % объектного кода или текстов на языках высокого уровня.

**Сопровождение и реинжиниринг.** Сопровождение системы в рамках CASE-технологии характеризуется сопровождением проекта, а не программных кодов. Средства реинжиниринга и обратного инжиниринга позволяют создавать модели системы из ее кодов и интегрировать полученные модели в проект, автоматически обновлять документацию при изменении кодов и т. п.

Программные продукты CASE-систем для концептуального проектирования автоматизированных ИС поддерживают методологию IDEF. Они известны в России как BPWin, ERWin, OOWin фирмы Logic Works, Design/IDEF фирмы Meta Software, Silverrun фирмы CSA и т. д.

Пакет BPWin поддерживает работу с моделями IDEF0, IDEF3, DFD. ERwin предназначена для разработок ИС по методике IDEF1X. Имеются средства, обеспечивающие перевод графических изображений ER-диаграмм в SQL-формы и в форматы других популярных СУБД. В систему включены также типичные для CASE средства разработки экранных форм (рис. 10, 11).

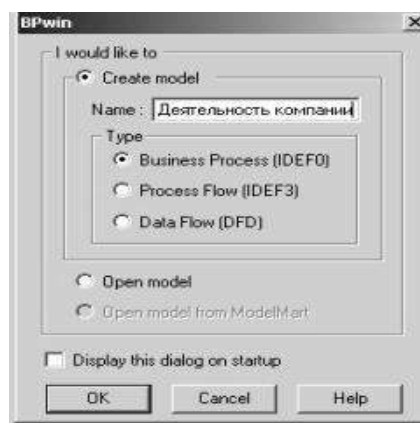


Рис. 10. Заставка начального определения модели в BPwin

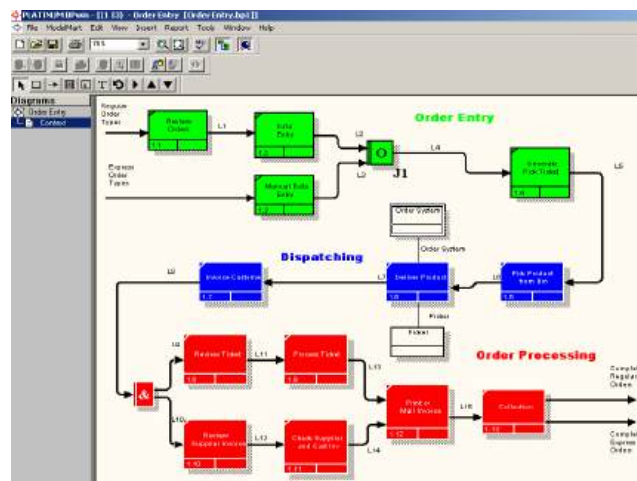


Рис. 11. Пример построения диаграммы IDEF в редакторе BPWin

OOWin служит для поддержки объектно-ориентированных технологий проектирования ИС. Один из способов использования OOWin — детализация объектно-ориентированной модели на базе созданной ER-модели. При преобразовании ER в ОО-представление сущности и атрибуты переводятся через преобразования классов (множествами подобных объектов).

AllFusion Process Modeler 7 (ранее BPwin) — инструмент для моделирования, анализа, документирования и оптимизации бизнес-процессов.

AllFusion Process Modeler 7 используют для графического представления бизнес-процессов. Он входит в состав пакета программных средств *AllFusion Modeling Suite*, комплексное использование которого обеспечивает возможность моделирования информационных систем (рис. 12). Продукт AllFusion Process Modeler 7 (BPwin) создан компанией Computer Associates.

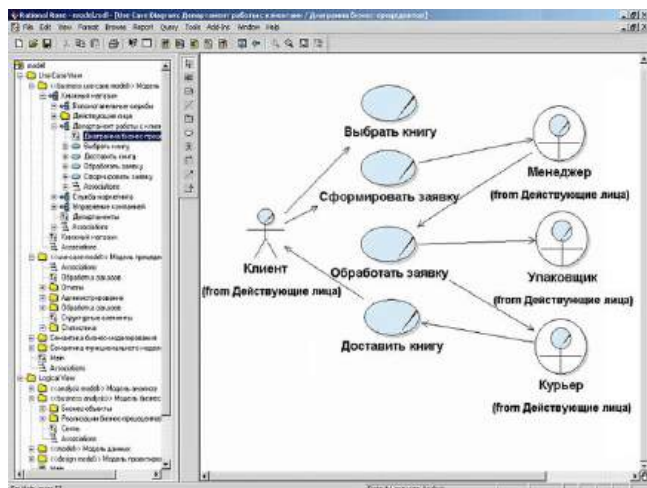


Рис. 12. Пример построения диаграммы IDEF0 в редакторе Rational Rose

Кроме AllFusion Process Modeler 7, при описании бизнес-процессов упоминаются ERwin Data Modeler (ранее ERwin), Data Model Validator (ранее ERwin Examiner) и Model Manager (ранее ModelMart).

К числу средств визуального моделирования объектно-ориентированных ИС относится программный комплекс Rational Rose. Продукт работает также на основе универсального языка моделирования UML, начиная с исследования бизнес-процессов, заканчивая кодами с генерацией на установленном языке программирования.

В Rational Rose модель представлена с четырех точек зрения или видов (View):

- Use Case View описывает, как проект выглядит с точки зрения его использования. Кто и куда вводит данные, что после этого делает программа и кому передает результат (см. рис. 12);
- Logical View — описание логики программы. Рекомендуется приступать к работе с этим аспектом модели в последнюю очередь, когда уже определено, что и в какой последовательности будет делать программа (описываются классы, их свойства и методы, отношения между классами) (рис. 13);
- Component View показывает, на какие компоненты разбит проект, что помещено в каждый из них. Здесь проектируют модули и зависимости между ними, переходы от главной программы к подпрограммам;
- Deployment View помогает продумать расположение физических устройств и связей между ними.

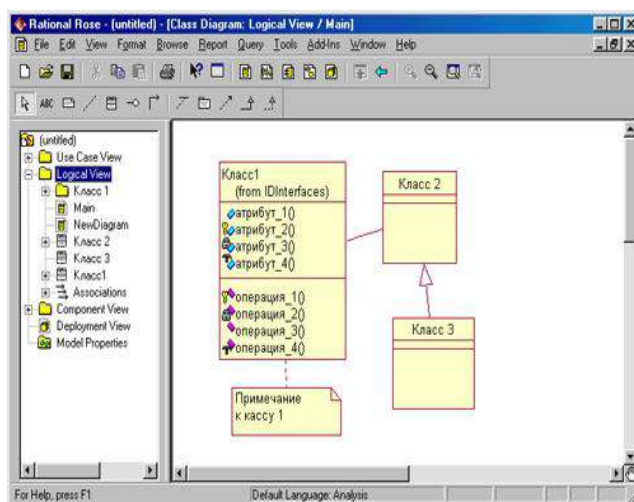


Рис. 13. Пример построения диаграммы IDEF1 в редакторе Rational Rose

В каждом из этих видов по умолчанию находится главная диаграмма — Main, в которой и отражается соответствующий аспект модели. Можно не ограничиваться ею и создавать другие диаграммы. Кроме того, в видах можно создавать дополнительные типы диаграмм: State diagram — диаграмма состояний и переходов между ними; Activity diagram отображает состояния системы и ее объектов, выполняемые действия и условные переходы; Interaction diagram — диаграмма взаимодействия объектов.

В связи с этим продуктом упоминается Rational Software — компания-разработчик программного обеспечения. До 2003 г. Rational была независимой компанией, но в 2003 г. она была куплена фирмой IBM. Большинство продуктов компании предназначено для моделирования и поддержки программного обеспечения. Также в компании разработана методология разработки программного обеспечения под названием Rational Unified Process (RUP). В этой методологии также даются рекомендации по всем этапам разработки: от моделирования бизнеса до тестирования и сдачи в эксплуатацию готовой программы.

### Заключение

Общие правила построения диаграмм показывают широкие возможности формирования с применением ИС полезных моделей для описания технологических процессов и выполнения подробного анализа их формирования, реинжиниринга, внедрения инноваций. Простейшие примеры, изучаемые в практических работах со студентами, показывают возможности положительного моделирования IDEF-диаграмм ИС для не слишком сложных моделей, таких, как оснащение цехов новым оборудованием, автоматизация заказов и их исполнения для ресторанного бизнеса, технологические усовершенствования производств различного назначения [16, 17].

Широта использования относительно новых методик, образующих в каждом случае описание разных технологий для систем информационных поддержек, порождает гносеологические задачи, целью которых являются распределение частей общих задач (их декомпозиция) и использование новых терминологических групп для их обозначений. Это важно в процессах обучения, а также для развития и совершенствования технического и программного видов обеспечения систем информационной поддержки [18, 19].

#### Литература

1. Энциклопедия PLM: сборник / под ред. Левина Д., Малюха В., Ушакова Д. и др. — Новосибирск: Изд. Дом "Азия", 2008. — 449 с.
2. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Холод И. И., Тесс М. Д., Елизаров С. И. Анализ данных и процессов: учеб. пособие. Изд. 3-е., перераб. и доп. — СПб: БХВ-Петербург, 2009. — 512 с.
3. Теория систем и вычислительные методы: сб. научн. тр. / под ред. Подстригача Я. С. — Киев: ИК, 1987. — 807 с.
4. Теория систем. Математические методы и моделирование: сб. ст. / Пер. с англ. Осетинского Н. И. — М.: Мир, 1989. — 382 с.
5. Касаев К. С. и др. Новые наукоемкие технологии: энциклопедия / под общей ред. Касаева К. С. — М.: НЦИТЭХ, 1999. — 264 с.
6. ГОСТ Р ИСО 9001-96 Система качества. Модель обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании. — М.: Госстандарт России.
7. Ильичев А. В., Волков В. Д., Грушанский В. А. Эффективность проектируемых элементов сложных систем. — М.: Высшая школа, 1982. — 420 с.
8. Елтаренко Е. А. Методы оценки и выбора инженерных и управленческих решений. — М.: МИФИ, 1987. — 47 с.
9. Гордеев Ю. А., Юсупов Р. М. Эффективность сложных технических систем. — М.: Наука, 1981. — 260 с.
10. Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. — М., 1977.
11. Отраслевая методика по определению экономической эффективности использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. МН-1.4.1153-83. — М.: НИАТ-1983. — 280 с.
12. Куприянов Е. М. Стандартизация и качество промышленной продукции. — М.: Высшая школа, 1985.
13. Сухов Г. М., Сухов С. Г. Основные понятия, эффективность и качество испытаний ЛА. — М.: МАТИ, 1994.
14. Васильев В. Г. Методы оптимизации больших технических систем в задачах системного проектирования. — Киев: Общество "Знание" УССР, 1981. — 96 с.
15. Костюков В. Д., Соколов В. П., Колесников А. В. Основные понятия математического моделирования. Тема № 1: конспект лекций по курсу "Математические модели" (направление 55.10 "Авиа- и ракетостроение"). — М.: МАТИ, 1998. — 29 с.
16. Сухов Г. М., Сухов С. Г. Системы автоматического регулирования и теория систем. — М.: МГТУ им. К. Э. Циолковского, 1994. — 54 с.
17. Методы оптимизации решений в стандартизации и унификации: сборник. — Ленинград: ЦНИИ "РУМБ", 1987. — 84 с.
18. Моисеев Н. Н. Простейшие математические модели экономического прогнозирования. — М.: Знание, 1975. — 57 с.
19. Оценка экономической эффективности новой техники и технологии, проектов по обновлению продукции и деятельности предприятия [Электронный ресурс]. Код доступа: <http://www.TMZ Soft Эффективность.html> (дата обращения: 10.09.04).

## SADT-TECHNOLOGY IN CONSTRUCTION OF IDEF-DIAGRAMS IN THE FORMATION OF THE STRUCTURAL COMPOSITION INSIDE INFORMATION SYSTEMS

V. A. Prudnikov

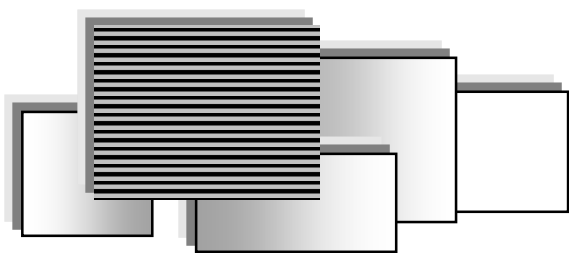
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The article is devoted to study of methods database formation inside information systems.*

**Keywords:** SADT, IDEF diagrams, data representation diagrams and processes.

Прудников Виталий Анатольевич, доцент.  
E-mail: prudnikovs64@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 22 октября 2019 г.*



## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.791: 004.89

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДЕКВАТНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕНТГЕНОГРАММ МЕТОДАМИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М. В. Овечкин, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия

*Рассматривается проблема автоматизации распознавания результатов рентгенографии сварных соединений. Предложено решение, основанное на методах искусственных нейронных сетей (ИНС), приведена структура сети. Описаны исследования влияния времени экспозиции и шумов на результаты распознавания.*

**Ключевые слова:** рентгенография, распознавание, ИНС, экспозиция, сварные соединения.

#### Постановка задачи

Идея автоматической расшифровки рентгеновских снимков появилась очень давно — одновременно с появлением компьютерных программ и анализа рентгеновских изображений. Однако автоматическая расшифровка и поиск дефектов не реализованы в полной мере [1].

Выполненные исследования позволили разработать нейросетевую модель процессов автоматизированного контроля сварных соединений методами коротковолнового электромагнитного излучения. В основе лежит синтезированная модель процессов контроля сварных соедине-

ний, особенностью которой является многокритериальный подход к общности структур и свойств множества методов коротковолнового электромагнитного излучения в рамках производства ответственных изделий [2].

#### Механизмы исследования

Структура искусственной нейронной сети программного модуля автоматизированной системы контроля сплошности изделий на примере рентгенографического исследования представлена на рис. 1.

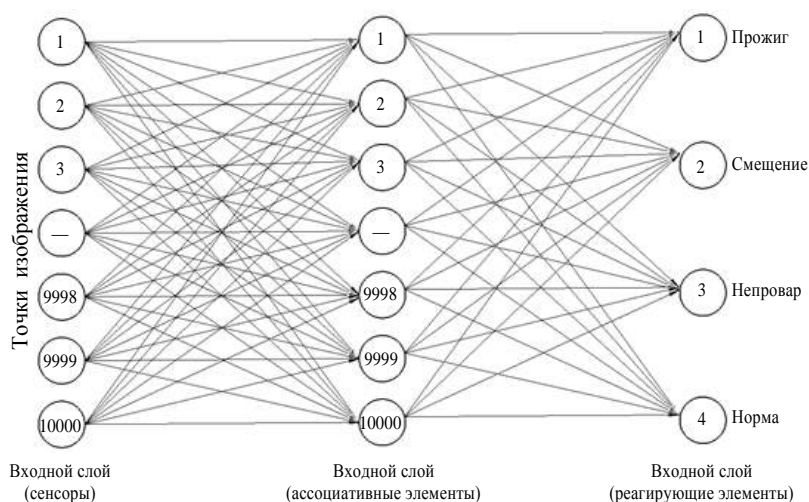


Рис. 1. Структура нейронной сети

На вход в искусственную нейронную сеть подаются данные (точки) оцифрованной рентгенограммы сварного соединения, сплошность которого необходимо проконтролировать. На сумматорах выходного слоя формируется численная вероятность принадлежности входных данных к одному из классов исследуемой области: "прожиг", "смещение", "непровар", "норма" [3].

### Проведение экспериментов

Проведем исследование на основании компьютерного модуля распознавания дефектов сварных соединений, основанного на искусственной нейронной сети. Имитационное моделирование является важным этапом исследования жизненного цикла объекта в целях определения его нормируемых показателей [4].

Первоначально осуществим проверку адекватности обучения, подав на вход нейронной сети различные области рентгенограмм с заранее известными дефектами (или их отсутствием).

На рис. 2 приведен пример проверки с подачей последовательно следующих образцов:

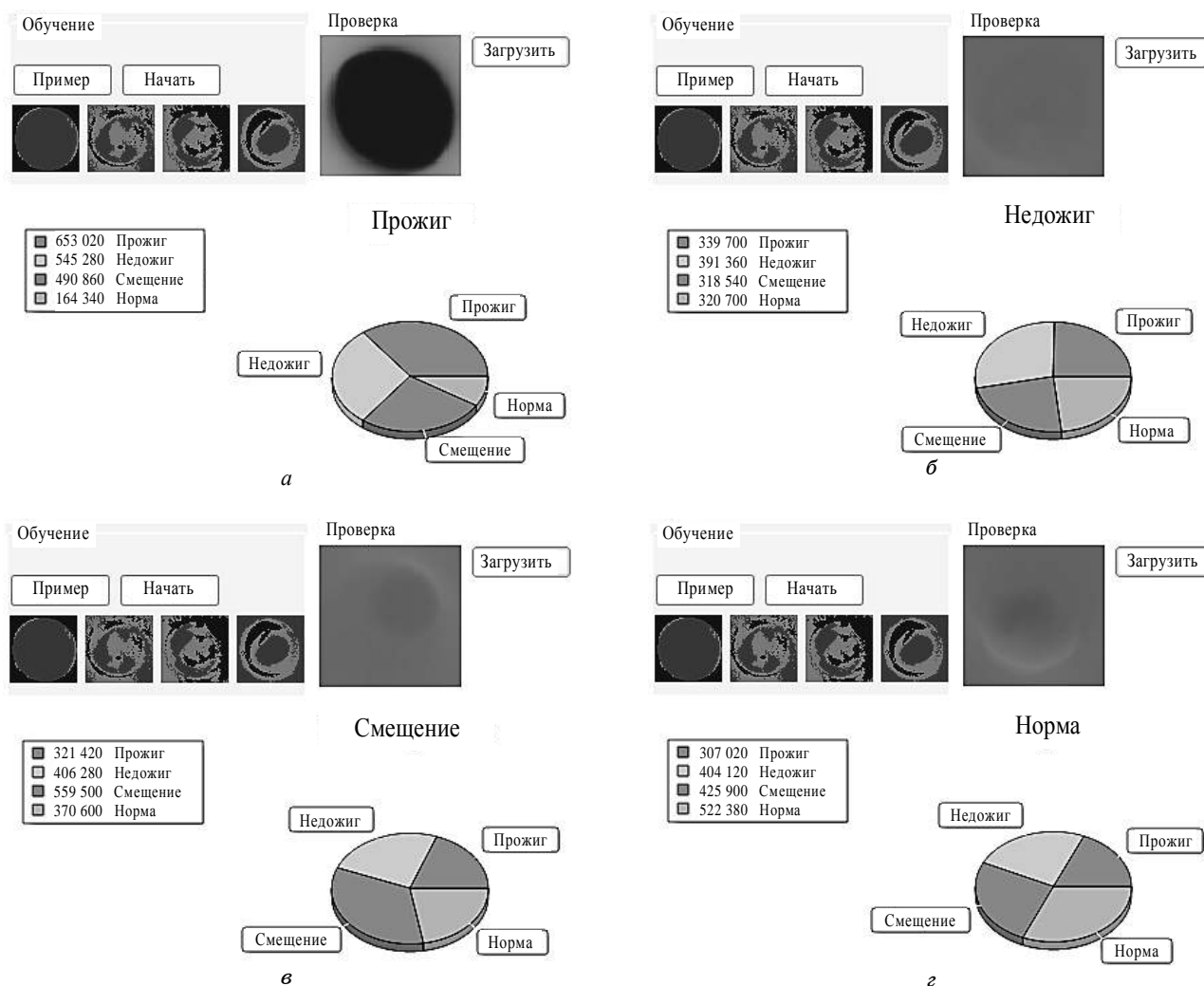
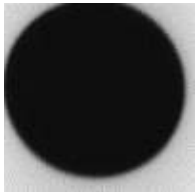

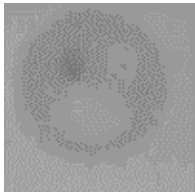
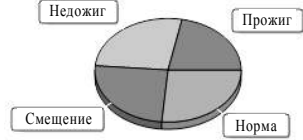
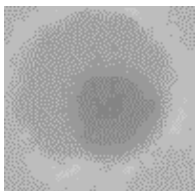

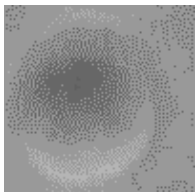



Рис. 2. Проверка адекватности работы ИНС:

а — дефект "прожиг"; б — дефект "недожиг"; в — дефект "смещение ядра"; г — отсутствие дефектов

Таблица 1

Проверка адекватности реализованной модели ИНС

Описание образца	Рентгенограмма образца	Результат распознавания ИНС	Оценка результата
Дефект "прожиг"		<p>Прожиг</p> 	Уверенное распознавание, не отличается от вариантов с верной экспозицией
Дефект "недожиг"		<p>Недожиг</p> 	Верное, но неуверенное распознавание. Вероятности отнесения к различным классам близки между собой
Дефект "смещение центра ядра"		<p>Смещение</p> 	Уверенное распознавание, не отличается от вариантов с верной экспозицией
Отсутствие дефектов		<p>Норма</p> 	Верное распознавание. Результаты правильной классификации преобладают в достаточной степени

При невозможности повторной съемки образцов решением проблемы распознавания объектов с неверно выставленной в сторону увеличения экспозицией может быть дополнительное наложение фильтра выделения границ (лапласиана) [6]. В качестве маски фильтра  $W$  рекомендуется следующая:

$$W = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 12 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix},$$

что дает запись лапласиана в виде

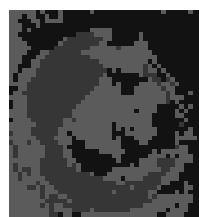
$$L[f(x, y)] = -f(x-1, y-1) - 2f(x, y-1) - f(x+1, y-1) - \\ - 2f(x-1, y) + 12f(x, y) - 2f(x+1, y) - f(x-1, y+1) - \\ - 2f(x, y+1) - f(x+1, y+1),$$

где  $\Delta x$  — приращение вдоль строки, равное 1 пикселу;

$\Delta y$  — приращение вдоль столбца, равное 1 пикселу.

Пример карт изображения (с использованием трехуровневой пастеризации) дефекта "смеще-

ние ядра", полученных с высоким временем экспозиции с применением фильтра выделения границ и без него, представлен на рис. 3. При наложении фильтра выделения границ на обучающую выборку нейросеть явно выделяет границы посадочного места под точечное сварное соединение, что "заставляет" нейроны среднего слоя более отчетливо реагировать на любые изменения цветности в данной зоне. Это ухудшает распознавание образцов с верно выставленной экспозицией, однако позволяет привлечь внимание к деталям на пересвеченных снимках.



а



б

Рис. 3. Карты рентгенограммы с дефектом "смещение ядра":

а — до наложения фильтра; б — после наложения фильтра



Исследуем также влияние зашумленности изображения на результаты распознавания. Шумы могут возникать вследствие конструкции самих рентген-аппаратов (шумы флуктуации фотонов, шумы детекторных систем) [7], влияния окружающей среды (тепловые и магнитные возмущения), недостаточно высокого качества регистрирующей пленки.

Суммарный эффект от подобных источников шума целесообразно описывать распределенной по закону Гаусса случайной величиной, т. к. дисперсия шума пикселя выходного изображения линейно растет со значением накопленного в данной точке сигнала.

Обобщение результатов эксперимента по распознаванию зашумленных изображений с адекватно, но наиболее неуверенно распознаваемым образом — дефектом "недожиг" представлено в табл. 2.

Результаты эксперимента по наложению шумов позволяют сделать вывод об отсутствии отрицательного влияния смоделированных по Гауссу шумов на итоги распознавания. Объяснить это можно тем, что равномерно создаваемые шумы не меняют общих закономерностей

принадлежности объекта к классу, выявленных сетью.

Использование разработанных решений позволит сократить затраты на предпроектные исследования по выбору метода автоматизации распознавания рентгенограмм. Это приведет к более эффективной модели конструирования стоимости конечного продукта и, как следствие к более гибкому управлению всем жизненным циклом изделия [8, 9].




### Выводы

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод об адекватности и целесообразности применения механизма искусственных нейронных сетей к решению проблемы распознавания рентгенограмм сварных соединений. Верным образом обученная сеть позволяет нивелировать зашумленность изображений и ошибки оператора при выборе экспозиции.

*Статья подготовлена в рамках проекта по гранту президента № МК — 5451.2018.8.*

Таблица 2

Обобщенные результаты исследования зашумленных рентгенограмм

Уровень зашумленности, %	Изображение (яркость увеличена)	Результат распознавания ИНС
25		<div> <div> 108 120 Прожиг  518 140 Недожиг  447 320 Смещение  335 720 Норма </div> <div> Недожиг  Прожиг  Смещение  Норма </div> </div>
35		<div> <div> 158 740 Прожиг  430 720 Недожиг  428 220 Смещение  341 280 Норма </div> <div> Недожиг  Прожиг  Смещение  Норма </div> </div>
50		<div> <div> 151 960 Прожиг  528 760 Недожиг  441 060 Смещение  328 240 Норма </div> <div> Недожиг  Прожиг  Смещение  Норма </div> </div>

*Литература*

1. Багаев К. А. Еще раз об автоматической расшифровке рентгеновских снимков сварных швов // NDT World, 2015. № 3 (18). С. 62—66.
2. Овечкин М. В. Нейросетевая модель процессов автоматизированного контроля сварных соединений методами коротковолнового электромагнитного излучения // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2018. № 6. С. 22—24.
3. Овечкин М. В. Программное обеспечение автоматизированной системы контроля сплошности изделий на основе искусственных нейронных сетей // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 6. С. 57—59.
4. Кондусова В. Б. Применение имитационного моделирования в рамках контракта жизненного цикла в целях определения его нормируемых показателей // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 4. С. 49—52.
5. Комплексы цифровой радиографии Фосфоматик. Руководство по эксплуатации и паспорт. — СПб., 2006 — 36 с.
6. Потапов А. А., Пахомов А. А., Никитин С. А., Гуляев Ю. В. Новейшие методы обработки изображений. — М.: Физматлит, 2008. — 496 с.
7. Майоров А. А. Компьютерная радиография с использованием флуоресцентных запоминающих пластин — что это такое? // В мире НК. 2004. № 2 (25). С. 42, 43.
8. Кондусова В. Б. Исследование модели конструирования стоимости как инструмента управления жизненным циклом изделия // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2018. № 4. С. 65—68.
9. Кондусова В. Б., Кондусов Д. В. Разработка имитационной модели жизненного цикла сложных изделий машиностроения с длительным сроком эксплуатации на основе применения контракта жизненного цикла // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 2. С. 30—34.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ADEQUACY OF RECOGNITION OF RADIOGRAPHS BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

M. V. Ovechkin

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University",  
Orenburg, Russia

*The article deals with the problem of automation of recognition of the results of radiography of welded joints. A solution based on the methods of neural networks is proposed, the structure of the network is given. Studies of the effect of exposure time and noise on recognition results are described.*

*Keywords:* radiography, pattern recognition, neural networks, exposure, weld joint.

Овечкин Максим Владимирович, доцент.  
E-mail: maxov-1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 октября 2019 г.

## UML-ДИАГРАММА КЛАССОВ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ВЫТЯЖНОГО ИНСТРУМЕНТА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

А. И. Сергеев, д-р техн. наук; А. И. Сердюк, д-р техн. наук  
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия

А. В. Щеголев, канд. техн. наук  
АО «Механический завод», г. Орск, Оренбургская обл., Россия

*Рассматривается проблема проектирования вытяжного инструмента, от геометрии которого зависят возможность изготовления и качество полуфабрикатов и изделий. Приведено математическое обеспечение, необходимое для расчета контура инструмента. Разработана UML-диаграмма классов программы расчета вытяжного инструмента цилиндрических изделий.*

**Ключевые слова:** холодная глубокая вытяжка, вытяжка с утонением, UML-диаграмма классов, пуансон, матрица.

### Постановка задачи

Широкое применение технологических процессов изготовления цилиндрических цельнотянутых изделий с фигурной, сферической и плоской донной частью методом глубокой вытяжки из листового проката обусловлено рядом факторов:

- обширная номенклатура производимых изделий от предметов бытового применения до изделий промышленного назначения, испытывающих высокие давления и скорости деформаций;
- высокая износостойкость оборудования и технологического инструмента;
- необходимая точность, экономичность и сравнительно небольшая станкоемкость изготовления изделий и технологического инструмента;
- высокий коэффициент использования металла [1].

В рамках поставленной Президентом РФ задачи по диверсификации производства предприятиями оборонно-промышленного комплекса [2] актуально решение проблемы оценки эффективности жизненного цикла наукоемкой продукции, в состав которой входят изделия пресового производства [3, 4]. Процессы холодной обработки металлов давлением, к которым относится глубокая вытяжка, позволяют не только осуществлять формообразование изделий с заданной точностью, но и получать за счет деформационного упрочнения высокие прочностные характеристики [5]. Это позволяет изготавливать изделия значительно меньшей массы.

В процессе холодной глубокой вытяжки с утонением основным формообразующим инструментом являются пуансоны и матрицы, от геометрии которых напрямую зависят возможность изготовления и качество полуфабрикатов и изделий. Ошибки в расчетах вытяжного инструмента приводят к возникновению дефектов,

которые могут быть выявлены на заключительных стадиях многооперационного производства.

### Математическая постановка задачи

Схемы пуансонов с различным количеством радиусов осевого сечения для вытяжки цилиндрических изделий с указанием основных расчетных размеров приведены на рис. 1.

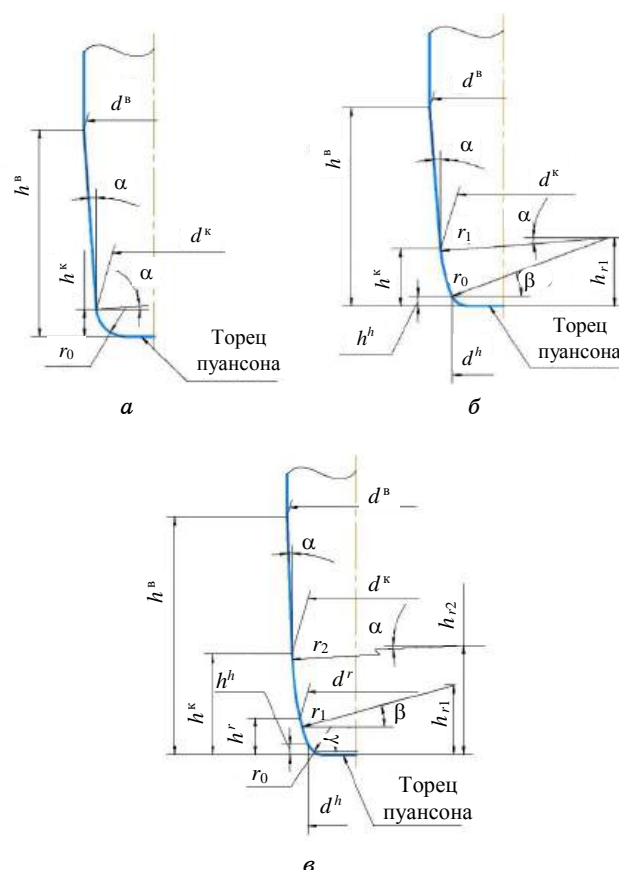


Рис. 1. Эскизы пуансонов с различным количеством радиусов осевого сечения:

а — с одним радиусом; б — с двумя; в — с тремя

Вытяжки с утонением выполняют как через одну, так и через две матрицы (рис. 2). Использование двух матриц позволяет назначить большую степень деформации.

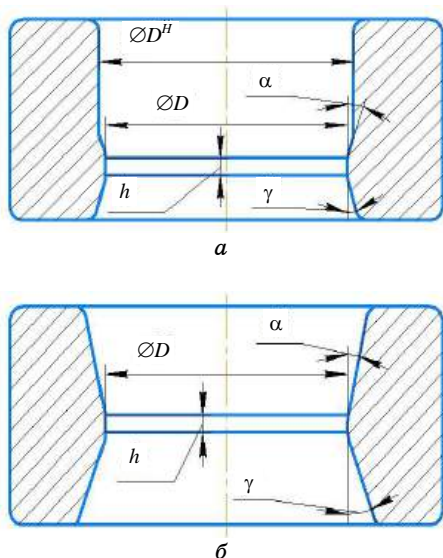


Рис. 2. Эскизы осевых сечений матриц: а — матрица верхняя; б — нижняя

В соответствии с рис. 1 определим координаты точек сопряжения на образующем контуре осевого сечения пуансона.

Для пуансона с одним радиусом осевого сечения (рис. 1, а) определим высоту точки сопряжения радиуса с образующей конуса:

$$h^K = r_0 (1 - \sin \alpha), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол конуса, определяемый по формуле

$$\alpha = \arctg \frac{d^B - d^K}{2(h^B - h^K)}. \quad (2)$$

Для пуансона с двумя радиусами осевого сечения (рис. 1, б) угол  $\alpha$  определяют аналогично пуансону с одним радиусом по формуле (2). Определим высоту центра большого радиуса  $r_1$ :

$$h_{r1} = h_{r0} + r_1 \sin \alpha, \quad (3)$$

где  $h_{r0}$  — высота центра радиуса  $r_0$ , равна значению радиуса, так как торец пуансона располагается по касательной, мм.

Определим высоту точки сопряжения радиусов. Так как

$$\sin \beta = \frac{h_{r1} - r_0}{r_1 - r_0}, \quad (4)$$

то имеем

$$h^h = r_0 (1 - \sin \beta). \quad (5)$$

Диаметр пуансона в точке сопряжения радиусов определим как

$$d^h = d^K - 2r_1 (\cos \alpha - \cos \beta). \quad (6)$$

Для пуансона с тремя радиусами (рис. 1, в) определим синус угла  $\beta$ :

$$\sin \beta = \frac{h_{r2} - h_{r1}}{r_2 - r_1}. \quad (7)$$

Тогда высота точки сопряжения радиусов  $r_2$  и  $r_1$

$$h^r = h_{r1} - r_1 \sin \beta. \quad (8)$$

Диаметр пуансона в точке сопряжения радиусов  $r_2$  и  $r_1$  определим как

$$d^r = d^K - 2r_2 (\cos \alpha - \cos \beta). \quad (9)$$

Для определения точки сопряжения радиусов  $r_1$  и  $r_0$  найдем синус угла  $\gamma$ :

$$\sin \gamma = \frac{h_{r1} - r_0}{r_1 - r_0}. \quad (10)$$

Тогда

$$h^h = h_{r1} - r_1 \sin \gamma. \quad (11)$$

Диаметр пуансона в точке сопряжения радиусов  $r_1$  и  $r_0$

$$d^h = d^r - 2r_1 (\cos \beta - \cos \gamma). \quad (12)$$

Диаметры пуансона вытяжки с утонением в верхнем сечении  $d^B$  и в точке сопряжения конуса с радиусом  $d^K$  определяют по формулам

$$d^B = D - 2S^B, \quad (13)$$

$$d^K = D - 2S^K, \quad (14)$$

где  $D$  — диаметр матрицы, мм (для последней вытяжки равен диаметру изделия);

$S^B$  и  $S^K$  — толщина стенки полуфабриката в соответствующих сечениях, мм (определяется по чертежу).

Приведенные формулы в основном применимы для пуансона последней вытяжки. Так как размеры пуансона предпоследней ( $n-1$ )-й вытяжки определяют в зависимости от размеров матрицы, определим ее рабочий диаметр:

$$D_{n-1} = \sqrt{\frac{4F_{n-1}^h}{\pi} + (d_{n-1}^h)^2}, \quad (15)$$

$F_{n-1}^h$  — площадь поперечного сечения полуфабриката предпоследней вытяжки с утонением внизу, мм<sup>2</sup>, определяется по формуле:

$$F_{n-1}^h = \frac{F_n^h}{1 - K^h}; \quad (16)$$

$F_n^h$  — площадь поперечного сечения полуфабриката последней вытяжки с утонением внизу, мм<sup>2</sup>:

$$F_n^h = \frac{\pi}{4} \left[ D_n^2 - (d_n^h)^2 \right]; \quad (17)$$

$d_{n-1}^h$  — диаметр пуансона предпоследней вытяжки с утонением в нижнем сечении на высоте  $h^h$  от торца, мм:

$$d_{n-1}^h = d_n^h + \lambda; \quad (18)$$

$\lambda$  — зазор на вхождение пуансонов, мм.

После определения диаметра матрицы рассчитаем диаметр пуансона предпоследней вытяжки с утонением в верхнем сечении:

$$d_{n-1}^B = \sqrt{D_{n-1}^2 - \frac{D_n^2 - (d_n^B)^2}{1 - K_n^B}}, \quad (19)$$

где  $K_n^B$  — степень деформации в верхнем сечении.

Диаметр пуансона предпоследней вытяжки с утонением в точке сопряжения конуса и радиуса

$$d_{n-1}^K = \sqrt{D_{n-1}^2 - \frac{D_n^2 - (d_n^K)^2}{1 - K_n^K}}, \quad (20)$$

где  $K_n^K$  — степень деформации в точке сопряжения конуса и радиуса.

### Проектирование программного средства

Для автоматизации проектирования вытяжных инструментов разработано программное средство, позволяющее определять контур формующих элементов с последующим их построением в САПР КОМПАС-3D.

В основу разработки положен принцип объектно-ориентированного программирования. Выделено два класса: *TMatrica* и *TPuanson*. UML-диаграмма разработанных классов приведена на рис 3. Выделение в отдельные классы верхней и нижней матриц нецелесообразно, так как в процессе проектирования экземпляр класса *TMatrica* может неоднократно изменять свое положение с верхнего на нижнее.

Рассмотрим свойства класса *TPuanson*. Свойство *Build\_array* предназначено для хранения вспомогательных данных, используемых для построения трехмерных моделей и чертежей, таких, как координаты точек сопряжения, координаты центров рассчитанных радиусов и т. д.

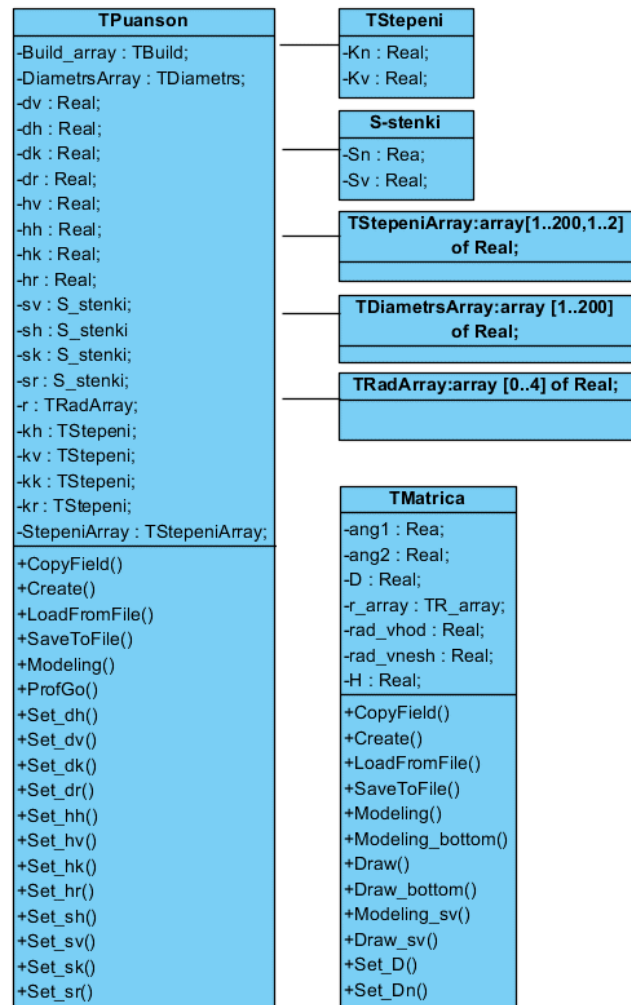


Рис. 3. UML-диаграмма классов *TPuanson* и *TMatrica*

Свойства  $d^v$ ,  $d^k$ ,  $d^r$ ,  $d^h$  задают диаметры пуансона в точках сопряжения конуса с цилиндром, конуса с большим радиусом, большого и среднего радиусов и в точке сопряжения среднего и малого радиусов соответственно. Свойства  $h^v$ ,  $h^k$ ,  $h^r$ ,  $h^h$  задают высоты соответствующих расчетным диаметрам точек сопряжения, а свойства  $s^v$ ,  $s^k$ ,  $s^r$ ,  $s^h$  — соответствующие толщины стенок. Свойства  $k^v$ ,  $k^k$ ,  $k^r$ ,  $k^h$  типа *TStepeni* позволяют задавать степени деформации для верхней и нижней матриц. Массив *StepeniArray: TStepeniArray* используют для построения графика распределения степеней деформации по длине полуфабриката.

Назначение методов *CopyField()*, *Create()*, *LoadFromFile()*, *SaveToFile()* понятно из их названия. Метод *Modeling()* предназначен для построения трехмерных моделей вытяжных инструментов и чертежей в САПР КОМПАС-3D, включает в себя процедуры построения пуансонов с одним, двумя и тремя радиусами. Метод *ProfGo()* реализует этап профилирования пуансонов — построение контура каждого вытяжного пуансона в одной системе координат для определения возможных пересечений, которые недопустимы. Остальные методы реализуют расчет высот, диаметров и толщин стенок в со-

ответствующих точках сопряжения контура пуансона. Большинство этих методов перегружаемы (на рис. 3 не показано).

У класса *TMatrica* свойства предназначены для хранения данных о геометрии матрицы: *ang1*, *ang2* — углы  $\alpha$  и  $\gamma$  (см. рис. 2); *D* — диаметр рабочего пояса; *r\_array* — массив для хранения радиусов скруглений; *rad\_vhod* — радиус входной части верхней матрицы, в которой центрируется полуфабрикат; *rad\_vnesh* — радиус внешнего контура матрицы; *H* — высота матрицы. В отличие от пуансонов в классе *TMatrica* методы, реализующие геометрические построения, разнесены как по типам матриц, так и по типу построения. Методы *Modeling()* и *Draw()* предназначены для построения трехмерной модели и чертежа верхней матрицы вытяжки с утонением. Для нижней матрицы вытяжки с утонением разработаны соответствующие методы *Modeling\_bottom()* и *Draw\_bottom()*. Методы *Modeling\_sv()* и *Draw\_sv()* предназначены для построения трехмерной модели и чертежа матрицы вытяжки (свертки).

### Выводы

Таким образом, разработанное математическое обеспечение и структура классов позволяют использовать их в алгоритме проектирования вытяжного инструмента. Количество пуансонов и матриц зависит от количества вытяжных операций и степени заданной деформации. Это определяет, будет выполняться вытяжка через одну или через две матрицы. Созданные и заполненные расчетными данными массивы экземпляров описанных классов обеспечивают полноту и непротиворечивость ин-

формации, используемой на вспомогательных этапах проектирования (расчет высот полуфабрикатов, построение графиков упрочнения по вытяжкам, назначение обрубных ножей, сохранение проектных данных).

*Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Оренбургской области в рамках проекта "Внедрение в хозяйственный оборот машиностроительных предприятий Оренбургской области методологии конструкторско-технологической подготовки прессовых операций".*

### Литература

1. Лысов В. А., Абрамова Н. Б., Яне В. С., Шевченко О. В., Щеголев А. В. Автоматизация профилирования осевых сечений пуансонов гладкой совокупностью дуг кривых третьего порядка в технологических процессах глубокой вытяжки // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2013. № 4 (120). С. 31—39.
2. Сударилов М. Д., Ляпин М. И. Анализ проблем развития инновационного предпринимательства на предприятиях машиностроительной отрасли // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2018. № 2 (138). С. 62—70.
3. Кондусова В. Б., Кондусов Д. В. Разработка имитационной модели жизни цикла сложных изделий машиностроения с длительным сроком эксплуатации на основе применения контракта жизненного цикла // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 2 (174). С. 30—34.
4. Кондусова В. Б. Применение имитационного моделирования в рамках контракта жизненного цикла в целях определения его нормируемых показателей // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 4 (172). С. 49—52.
5. Травин В. Ю. Методика проектирования технологии холодного деформирования современных артиллерийских гильз: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тула, 1999.

## UML-CLASS DIAGRAM OF THE PROGRAM FOR CALCULATING THE DRAWING TOOL CYLINDRICAL PRODUCTS

A. I. Sergeev, A. I. Serduk

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University",  
Orenburg, Russia

A. V. Schegolev

Joint-Stock Company "Mechanical Plant", Orsk, Orenburg region, Russia

*The article deals with the problem of designing a drawing tool from the geometry of which depends on the possibility of manufacturing and quality of semi-finished products and products. The mathematical software required for calculating the contour of the tool is given. The UML diagram of classes of the program of calculation of the drawing tool of cylindrical products is developed.*

**Keywords:** cold deep drawing, thinning drawing, UML class diagram, punch, matrix.

Сергеев Александр Иванович, профессор.

E-mail: alexandr\_sergeew@mail.ru

Сердюк Анатолий Иванович, профессор.

E-mail: sap@mail.osu.ru

Щеголев Андрей Владиславович, генеральный директор.

E-mail: andrejshegolev@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12 августа 2019 г.

УДК 656.073.53

## АНАЛИЗ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОНЕФТЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

М. Ю. Катаев, д-р техн. наук; С. Ю. Хотненко  
Томский государственный университет, г. Томск, Россия

*Представлен анализ состояния логистической структуры движения оборудования газонефтедобывающего предприятия. Выделены основные бизнес-процессы перемещения оборудования во время производственного цикла. Выявлены факторы, влияющие на качество функционирования данной логистической структуры. На основании полученной информации разработана схема организации бизнес-процессов для повышения качества функционирования данной логистической структуры. Основой предлагаемого подхода являются фиксация и передача в сеть информации об отбытии и прибытии оборудования, а адрес устройства определяет лицо, проводящее процесс загрузки-выгрузки оборудования. Такая структура позволяет не только контролировать процесс движения оборудования по маршруту, но и строить модели оптимальных маршрутов.*

**Ключевые слова:** логистика, нефтегазодобывающее предприятие, бизнес-процесс, системный анализ.

Логистические услуги связывают между собой различного рода предприятия и потребителей процессами распределения продукции. Эффективность такого процесса определяет стоимость и качество продукции и зависит от влияния множества факторов, одним из которых является учет особенностей бизнес-процессов. Транспортные услуги являются одним из элементов бизнес-процессов, где оптимизация технических средств, контрольных функций и бизнес-процессов служит важнейшим инструментом для поддержания стабильности и развития. Элементы технического прогресса, искусственный интеллект, вычислительные и телекоммуникационные средства позволяют использовать их для повышения эффективности логистических услуг [1, 2]. Менее развитыми элементами логистической структуры предприятий в России являются разработка бизнес-процессов [3], их анализ [4], реинжиниринг [5] и оптимизация бизнес-процессов [6] транспортировки грузов. Особенно это важно для газонефтедобывающих предприятий, где удаленность производственных объектов, сложность дорожной сети, множественность пунктов перемещения транспортируемых грузов привносят особые требования. Поэтому разработка и реализация подхода к управлению бизнес-процессами логистической структуры предприятий являются наиболее актуальным направлением развития для обеспечения оперативности управления и сохранности перевозимой продукции.

### Формулировка проблемы

Бурный рост развития информационных технологий в начале XXI в. вызвал значительные изменения в различных сферах деятельности

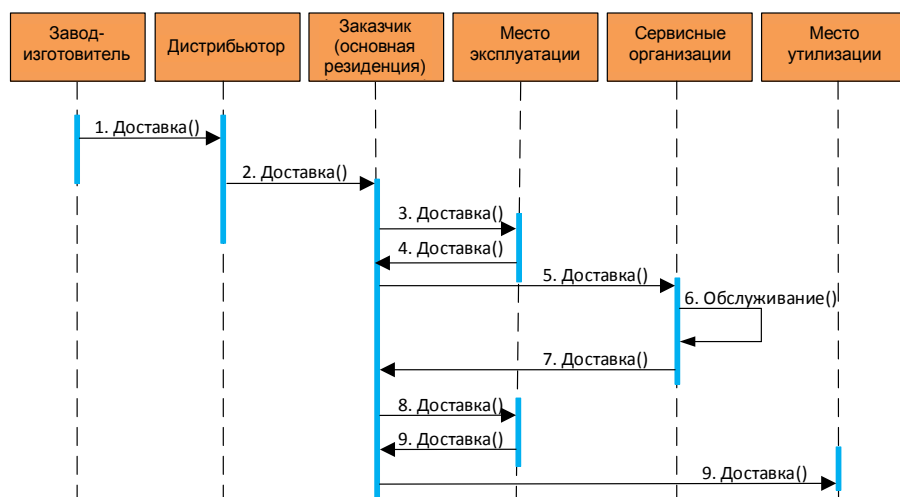
человека. Развитие сетевых технологий позволило снизить стоимость обработки данных, что способствовало увеличению их количества. По данным опросов, проводимых аналитическими компаниями, прирост данных за последние 20 лет составил от 40 до 60 % [7]. Скорость прироста данных является основной проблемой, на решение которой направлены передовые ИТ-технологии. Процессы решения задач автоматизации производств посредством внедрения технологий обработки информации приняты классифицировать концепцией Индустрии 4.0. Этот термин подразумевает четвертую, техническую революцию после появления аграрного, индустриального и информационного общества [8].

Итак основным ресурсом, необходимым для качественного функционирования информационных и производственных систем, является время обработки информации. Скорость принятия решения служит основным фактором, определяющим устойчивость системы. В связи с этим приоритетной задачей является анализ алгоритмов протекания бизнес-процессов для их формализации и автоматизации [9].

Рассмотрим жизненный цикл оборудования от его отгрузки со склада предприятия-изготовителя до утилизации.

На рис. 1 приведена диаграмма последовательностей (Sequences diagram) жизненного цикла оборудования газонефтедобывающего предприятия. После отгрузки со склада завода-изготовителя оборудование поступает на склад дистрибьютора, оттуда — на склад заказчика. Далее оборудование направляют на объект для эксплуатации. В случае поломки оборудование отправляют в сервисный центр. После окончания срока эксплуатации оборудование направляют в его финальное местоположение для утилизации.





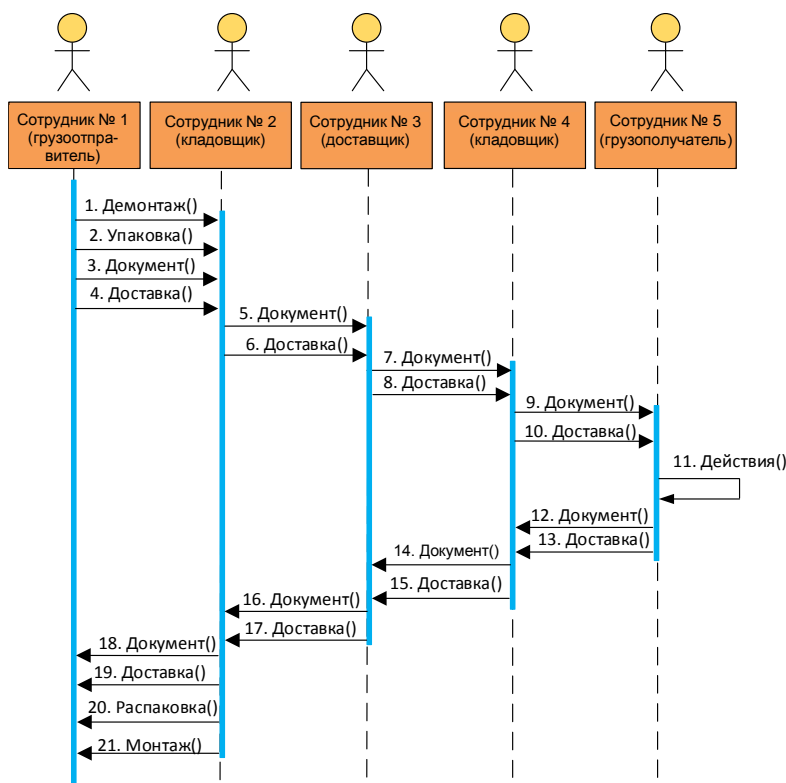
*Рис. 1. Жизненный цикл нефтегазового оборудования*

Как видно из рис. 1, за время своего существования оборудование прodelывает значительный путь и оказывается связанным со значительным количеством сотрудников, проводящих процесс загрузки-выгрузки. В случае пересылки оборудования от производителя до заказчика логистика происходит в среде развитой инфраструктуры, возможно использование транспортных компаний. Однако в случае перемещения оборудования на объекты газонефтяных предприятий не во всех случаях существует необходимая для доставки инфраструктура. В результате процессы движения оборудования от точки отправления до точки получения сопряжены с разнообразными рисками. К таким рискам можно отнести: задерж-

ку времени доставки; смену лица, ответственного за прием оборудования; неверную идентификацию оборудования по специальным меткам и т. д.

### Предлагаемое решение

Осуществим процесс декомпозиции бизнес-процессов логистической системы движения материально-технических ценностей газонефтедобывающего предприятия на ремонт/поверку. На рис. 2 приведена диаграмма последовательностей бизнес-процессов, протекающих при транспортировке оборудования для ремонта или поверки в сторонние организации, находящиеся в городе Томске.



*Рис. 2. Существующая последовательность бизнес-процессов движения материально-технических ценностей*

Анализируя данную диаграмму, несложно заметить повторяющийся процесс "Документ". Это документооборот, подтверждение передачи материально-технических средств от одного актора к другому. Также можно заметить, что процесс движения груза является непрозрачным и местоположение, груза не может быть однозначно определено в любой момент времени. Местоположение груза при транспортировке может быть при необходимости определено по запросу извне. С учетом отсутствия у газонефтедобывающего предприятия контроля за временными затратами на передвижение материально-технических средств возникают риски задержек перемещения или потери оборудования. Велико влияние человеческого фактора, что зачастую является причиной задержек при транспортировке.

## Оптимизация условий перемещения оборудования

На рис. 3 приведена оптимизированная схема верхнего уровня системы с учетом выявленных недостатков. Отличие от схемы, показанной на рис. 2, заключается в добавлении дополнительного объекта — геоинформационной системы (ГИС). Данный объект является системой индикации местоположения груза. При проходе по маршруту от одного контрольного пункта (КП) к другому данные о местоположении груза (GPS-координаты) заносятся в базу данных и отображаются на интерактивной карте. Процесс прохождения грузов по маршруту в сторонние организации и обратно однозначно определен. Такая структура позволяет значительно снизить нагрузку на рабочий пер-

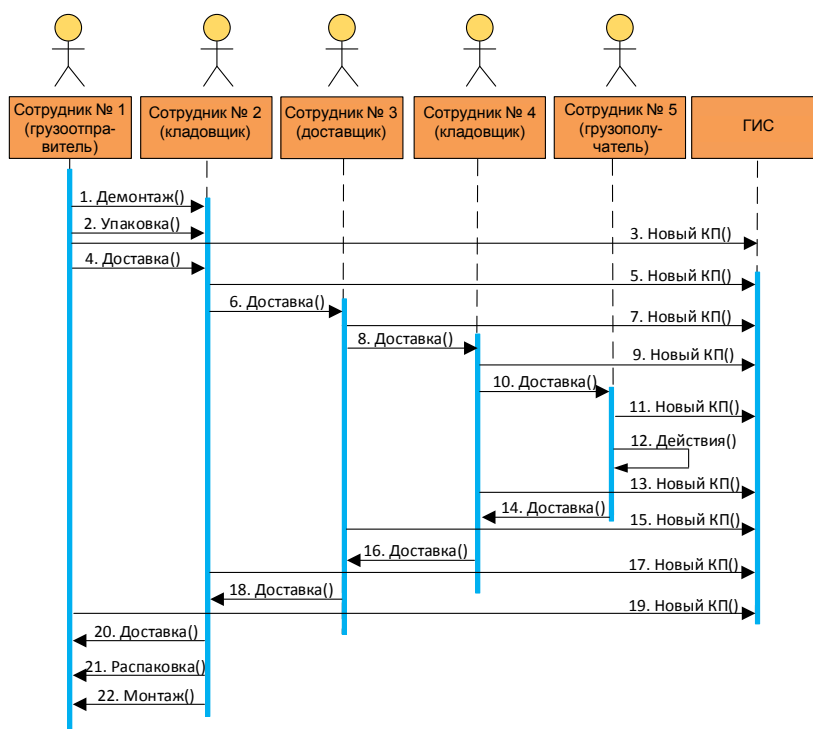
сонал, снизить обусловленные человеческим фактором риски утери или несвоевременной доставки оборудования.

Фактически для реализации методики, определяемой рис. 3, необходимо применить методики технического зрения [10], которые считают маркировку транспортных ящиков оборудования и передают ее в ГИС. В этом случае все пространственно-временные перемещения оборудования и ответственные лица фиксируются в геоинформационной системе. Время и пункты промежуточной доставки могут быть заранее включены в ГИС. По мере перемещения оборудования ГИС будет показывать соответствие разработанному плану или отклонение от него.

Таким образом, реализация приведенной схемы бизнес-процессов позволит собирать и обрабатывать данные о перемещении оборудования в течение всего жизненного цикла. Обработка данных позволит оптимизировать расходы на логистику, повысить устойчивость системы и исключить влияние человеческого фактора.

## Перспективы внедрения разработанной схемы в производственный цикл

Любая производственная деятельность сводится к регламентируемой совокупности действий, направленных на производство продукта с повышенной добавочной стоимостью и его реализацию. В случае нефтегазовой промышленности это добыча сырой нефти, её подготовка к товарному состоянию и переработка. Все бизнес-процессы, связанные непосредственно с технологическим циклом подготовки нефти,



**Рис. 3. Оптимизированная последовательность бизнес-процессов движения МТЦ**

являются основными, а все прочие лишь сопровождают их (логистика в том числе). Устойчивое функционирование газонефтедобывающего предприятия возможно лишь в случае гармоничного взаимодействия всех его служб.

Как следует из официального сайта ПАО "Газпромнефть", "стратегическая цель "Газпромнефти" — стать крупным международным игроком российского происхождения, обладающим регионально-диверсифицированным портфелем активов по всей цепочке создания стоимости, активно участвуя в развитии регионов, обладая высокой социальной и экологической ответственностью" [10]. Проведение данной стратегии требует значительной системной интеграции всех служб, в том числе и логистики. Разработанная авторами схема организации бизнес-процессов способствует достижению стратегической цели ПАО "Газпромнефть" и всей нефтегазовой отрасли.

### Заключение

Проведено исследование процесса логистики доставки оборудования газонефтедобывающих предприятий. Выявлены факторы, приводящие к определенным рискам. Продуманы варианты решения возникающих проблем. Анализ полученных результатов показывает, что учет информации о местоположении и состоянии объ-

екта доставки при сложных и удаленных маршрутах позволит более точно оценивать текущую ситуацию. Развитием работ, по мнению авторов, станет математическая модель, учитывающая временные и иные риски, возникающие при доставке, которая позволит оценивать вероятность доставки.

### Литература

1. Мельников В. П., Схиртладзе А. Г. Исследование систем управления. — М.: Юрайт, 2014. — 447 с.
2. Иванов П. В. Методы принятия управленческих решений. — М.: Юрайт, 2019. — 276 с.
3. Абдикеев Н. М., Данько Т. П., Ильдеменов С. В., Киселев А. Д. Реинжиниринг бизнес-процессов. — М.: Эксмо, 2015. — 592 с.
4. Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. — 544 с.
5. Зенченко И. В. Управление бизнес-процессами. — М.: ФЛИНТА, 2017. — 116 с.
6. Информационные системы и технологии в экономике и управлении / под ред. проф. Трофимова В. В. — М.: Юрайт, 2014. — 521 с.
7. Мхитарян В. С. Анализ данных. — М.: Юрайт, 2019. — 490 с.
8. Цифровая нефть // Сибирская нефть. 2017. № 9 (146). С. 10—15.
9. Ковалев В. В., Волкова О. Н. Анализ хозяйственной деятельности предприятия. — М.: ТК Велби, Изд-во "Проспект", 2006. — 424 с.
10. Миссия и стратегия развития [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom-neft.ru/company/strategy/> (дата обращения: 07.10.2019).

## ANALYSIS OF BUSINESS PROCESSES OF LOGISTIC MOVEMENTS OF OIL AND GAS MINING ENTERPRISE

M. Yu. Kataev, S. Yu. Khotnenok  
Tomsk State University, Tomsk, Russia

*This article shows a brief review of logistic transferring system of an oil mining enterprise. Were pointed the main issues of the business processes of the transferring of equipment during the live cycle. Were identified the factors which affect the quality of the processes of the logistic system. Based on the information that was figured out, were created the logistic system due to stability. The new qualities will be achieved due to saving the location of equipment at every point of the path by software geoinformation system. The model of the proposing system will provide control of the transferring and helps to create the best path.*

**Keywords:** logistics, oil and gas mining enterprise, business process, systems analysis.

Катаев Михаил Юрьевич, профессор.  
E-mail: kmy@asu.tusur.ru  
Хотненко Сергей Юрьевич, аспирант.  
E-mail: khotnenok@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2019 г.

УДК 658.012

## ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ РИСКА В ПРОЦЕССЕ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В. И. Полянский, д-р техн. наук

АО «НИИ автоматической аппаратуры им. В. С. Семенихина», Москва, Россия

*Предлагается представлять в виде нечёткого множества показатели результатов принятия решений при оценивании риска.*

**Ключевые слова:** риск, нечёткое множество, функция принадлежности, нечёткое отношение.

Создание и эксплуатация автоматизированных систем управления (АСУ) требуют принятия разнообразных управленческих решений на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) создаваемой системы. Основным условием принятия управленческого решения является возможность определить предпочтительность принимаемого решения относительно других имеющихся альтернатив. Установление предпочтительности управленческих решений определяет содержание задачи оценки при принятии решений. Для решения задачи установления предпочтительности принимаемых решений каждый вариант должен быть охарактеризован одним или несколькими показателями, отражающими интенсивность проявления свойства «предпочтительности» рассматриваемого управленческого решения.

Таким образом, задача оценки предпочтительности управленческих решений заключается в формировании системы показателей, отражающих предпочтительность решений, оценивании данных показателей в соответствующих условиях принятия решений и установлении отношения порядка на основе полученных оценок среди возможных альтернативных вариантов решений. Наиболее сложным и наименее проработанным является вопрос выбора системы показателей, отражающих предпочтительность вариантов принимаемых решений. Чаще всего решение данного вопроса возлагается на лицо, принимающее решение. Поскольку показатели предпочтительности вариантов принимаемых управленческих решений отражают наиболее важные их свойства, то при выборе показателей необходимо установить данные свойства. Одним из наиболее важных свойств процесса принятия решений в условиях неопределенности, отражающим как возможности наступления нежелательных событий, так и потери, с ними связанные, является риск. Цель работы — обсуждение вопросов выбора системы показателей, отражающих риск, обусловленный принятием управленческих решений при создании и эксплуатации АСУ. Одним из требований к системе показателей принимаемых решений является требование различимости оцениваемых альтернатив. Данное требование определяет необходимость выбора такой системы показате-

телей, на основе которой можно сформировать отношение порядка на множестве возможных вариантов принимаемых решений. Чаще требование различимости трактуется с позиции возможности сравнительного сопоставления вариантов по степени их предпочтительности.

Формирование и оценивание показателей риска принимаемых решений осуществляется на основе информации о возможных (допустимых) вариантах управленческих решений

$$R = \{R_i, i = \overline{1, N}\},$$

где  $R_i$  —  $i$ -ый вариант управленческого решения,  $N$  — число допустимых вариантов решений и исходного множества доступных для измерения параметров, характеризующих сложившуюся на момент принятия решений управленческую ситуацию

$$\Pi = \{\pi_j, j = \overline{1, m}\},$$

где  $\pi_j$  —  $j$ -ый — параметр сложившейся управленческой ситуации;

$m$  — общее число параметров, характеризующих сложившуюся управленческую ситуацию.

Строгих правил для определения исходного множества параметров нет. Чем больше выбранных показателей, тем меньше остается неопределенности в результате принятого решения. Однако при формировании системы показателей риска принимаемых решений не все параметры текущей управленческой ситуации обладают одинаковой информативностью. Использование неинформативных параметров оказывается бесполезным и снижает эффективность самого процесса принятия решения, создавая помехи при распознавании. Кроме того, оценивание каждого параметра текущей управленческой ситуации сопряжено с определенными затратами и сложностями, в особенности, при принятии решений на этапах ЖЦ создаваемых образцов АСУ.

Примем допущение, что для оценивания значений  $j$ -го параметра текущей управленческой ситуации необходимо затратить  $C_j$  некоторого

ресурса. Это обстоятельство обуславливает необходимость определения некоторого оптимального числа параметров текущей управленческой ситуации, на основе которых можно выбрать тот или иной вариант решения из множества допустимых.

Выбор оптимального числа показателей и задание допусков на них осуществляются, как правило, методами статистического анализа [1]. Однако эти методы требуют проведения многократных испытаний на стадии производства и эксплуатации, знания законов распределения параметров при благоприятных и неблагоприятных событиях, что значительно удлиняет сроки проектирования и увеличивает стоимость системы. В условиях ограничения временных, материальных и финансовых ресурсов такие методы при разработке новых уникальных образцов АСУ становятся неприемлемыми.

Значения параметров текущей управленческой ситуации формируются на основании показателей датчиков, измерительных приборов и отображаются в строго фиксированных значениях вектора параметров  $\Pi$ . На практике не все значения данных параметров удается измерить вследствие сбоев в аппаратуре, наличия помех в каналах связи, воздействия неблагоприятных факторов. Неполнота информации о сложившейся управленческой ситуации на множестве выбранных параметров  $\Pi = \{\pi_j, j = \overline{1, m}\}$  может привести к неоднозначности результата принятия решений  $R_i \in R$ .

При оценивании риска принятия решений остро стоит проблема совмещения, обобщения разнообразных параметров, решение которой позволяет существенно снизить неоднозначность принимаемых решений.

Существуют известные методы [2] решения задачи совмещения разнообразных по физической природе параметров, например, параметров, связанных с преобразованием физических показателей в математические с помощью преобразования Карунена—Лоэва или представления разнородных по физической сущности показателей с помощью методов редукции на основе математической теории мер и неизмеримых пространств, в частности, меры Лебега.

Реализация каждого из этих подходов связана с дополнительными затратами из-за необходимости решения сложных математических задач (проблемы собственных чисел, проблемы построения измерительных шкал в теории мер), особенно при большом объеме измерительных параметров. Использование аппарата нечетких множеств снимает эти проблемы, так как в качестве показателей предпочтительности вариантов принимаемых решений используются не значения параметров, характеризующих оцениваемые варианты как таковые, а их относительные характеристики в виде функций принадлежности, представленные в идентичной форме [3].

В этом случае применение теории нечетких множеств снимает необходимость формирования модели, отражающей причинно-следственные связи между наблюдаемыми параметрами текущей управленческой ситуации, выбранным управленческим решением, с одной стороны, и результатами реализации решения, с другой стороны. Роль такой модели играет значение функции принадлежности, отражающее степень уверенности в правильности или неправильности рассматриваемого решения в соответствующей управленческой ситуации.

Предлагаемый новый подход предусматривает предварительное определение для каждого показателя  $\pi_j \in \Pi$  и допустимого решения  $R_i \in R$  модельных диапазонов изменения  $f_{ij}$ , обуславливающих возникновения негативных последствий при реализации решения. Степень уверенности в возникновении данных негативных последствий определяется функцией принадлежности  $\mu_{F_i}(f_{ij})$ .

Таким образом, на основе экспертного анализа будет сформирована матрица

$$F = \{f_{ij} | i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\} \text{ — показателей риска,}$$

элементы которой характеризуют диапазоны изменения параметров текущей ситуации, при которых в случае принятия управленческих решений ЛПР столкнется с определенными негативными последствиями.

Множество принимаемых решений  $R_i \in R | i = \overline{1, n}$  и показателей  $S$  находятся между собой в определенном отношении:

$$\Phi: R \times \Pi \rightarrow F \times M,$$

где  $M = \{\mu_{F_i, j} : F \rightarrow [0, 1], i = \overline{1, N}, j = \overline{1, m}\}$  — множество функций принадлежности, характеризующих степень уверенности в наличии рискованных результатов при принятии  $i$ -го решения в случае, если значение  $j$ -го параметра управленческой ситуации находится в диапазоне  $f_{ij}$ , т. е. каждая управленческая ситуация и вариант принимаемых решений отображаются в соответствующей реализации показателей риска.

Как правило, такое отношение формализуется в виде соответствующей матрицы нечетких отношений с элементами, идентифицируемыми по знаниям экспертов. Тогда множество показателей риска принимаемых решений также будет нечетким

$$S = \{f_{ij}, \mu_{F_i}(f_{ij})\}.$$

Операторы формирования нечеткого множества  $S = \{f_{ij}, \mu_{F_i}(f_{ij})\}$  определяются в виде процедуры вычисления функций принадлежности  $\mu_{F_i}(f_{ij})$ .

Модельные диапазоны изменения параметров управленческой ситуации  $f_{ij}$  и функции принадлежности  $\mu_{F_i}(f_{ij})$  задаются на основании имитационного и интеллектуального моделирования или опыта экспертов.

Математическую задачу выбора системы показателей риска в условиях неопределенности результатов принимаемых решений можно сформулировать в следующем виде:

$$\forall R_k \in R, R_i \in R \setminus R_k,$$

определить  $S_{k,i}^* = \{f_{k,j}, \mu_{F_k}(f_{k,j}), j \in J_i^*\}$ , для которых выполняются условия:

$$f_{k,j} \neq f_{i,j} \vee \mu_{F_k}(f_{k,j}) \neq \mu_{F_i}(f_{i,j}); \sum_{j \in J_i^*} C_j \leq C_{\text{доп}},$$

где  $J_i^*$  — множество номеров параметров управленческой ситуации, входящих в состав показателей риска  $S_{k,i}^*$ ;

$C_{\text{доп}}$  — критический уровень средних затрат на оценивание параметров управленческой ситуации.

Итак, рассматривая задачу оценки риска для каждой пары вариантов решений можно сформировать систему показателей, позволяющую обоснованно оценить предпочтительность решений по значению степени уверенности в возникновении негативных последствий, обусловленных реализацией принятых решений при текущей управленческой ситуации.

#### Литература

1. Миссия и стратегия развития [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom-neft.ru/company/strategy/> (дата обращения: 07.10.2019). Городецкий В. И. и др. Статистические методы в прикладной кибернетике. МО СССР, 1980. — 150 с.
2. Дмитриев А. К., Юсупов Р. М. Идентификация и техническая диагностика. Учебник для вузов. — Л. — МО СССР, 1987. — 521 с.
3. Полянский В. И. Нечёткие множества в моделях и методах диагностирования сложных технических систем, — М. Полиграф сервис, 2010. — 24 с.

## THE CHOICE OF INDICATORS OF THE RESULTS OF DECISION-MAKING IN ASSESSING RISK IN THE PROCESS OF CREATING AND OPERATING AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM

V. I. Polyansky

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

*There is proposed to present indicators of results of decision-making during estimation of risk in the form of fuzzy set.*

**Keywords:** risk, fuzzy set, membership function, fuzzy relation.

Полянский Владимир Иванович, советник по развитию генерального директора АО.  
E-mail: dvpolsky@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 января 2020 г.

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2020 г.**  
**на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»**

Наименование издания	Индекс издания (количество выпусков в год)	Цена 1 экз., руб.	Кол-во выпусков в год	Общая сумма, руб.
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России	79379 (4 вып.)	1550,00		
Конструкции из композиционных материалов	80089 (4 вып.)	1700,00		
Экология промышленного производства	80090 (4 вып.)	1500,00		
Информационные технологии в проектировании и производстве	79378 (4 вып.)	1750,00		
Вопросы защиты информации	79187 (4 вып.)	1750,00		
В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.				

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

**Наши реквизиты:**

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

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

ИНН/КПП \_\_\_\_\_

ОКПО \_\_\_\_\_

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

к/с \_\_\_\_\_ БИК \_\_\_\_\_

Юридический адрес: \_\_\_\_\_

Почтовый адрес: \_\_\_\_\_

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

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

**Справочно:**

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

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

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

8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-20.

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».