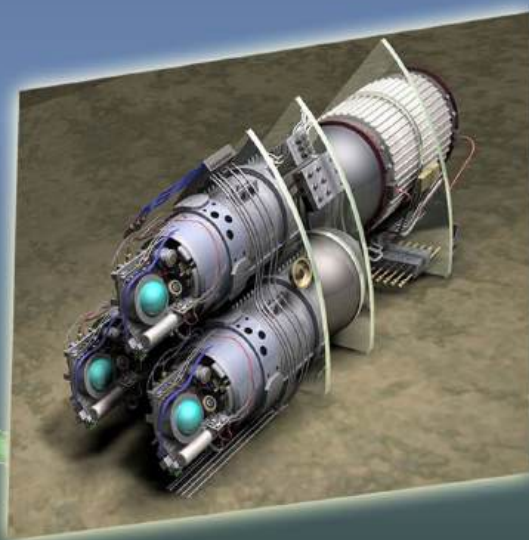
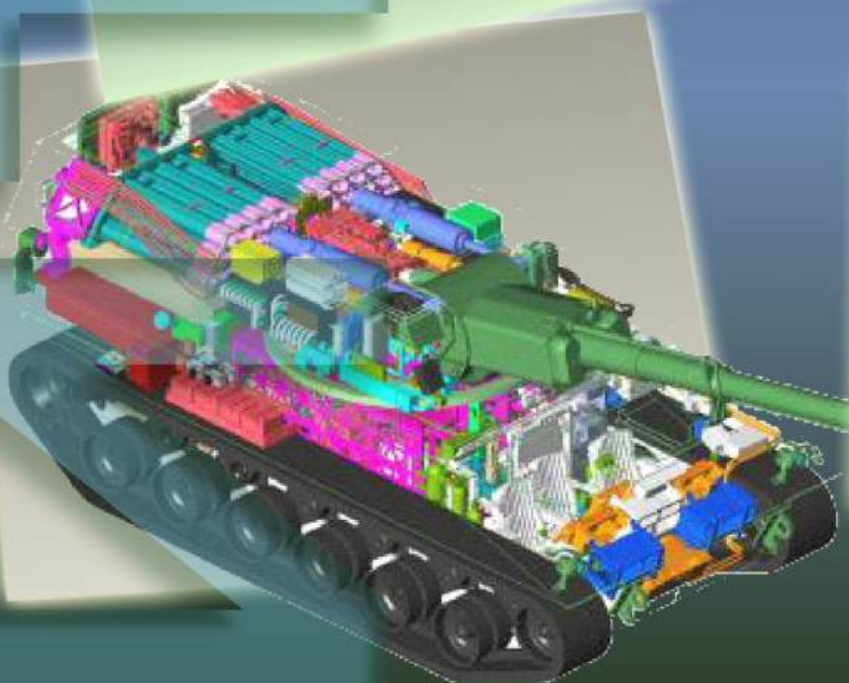
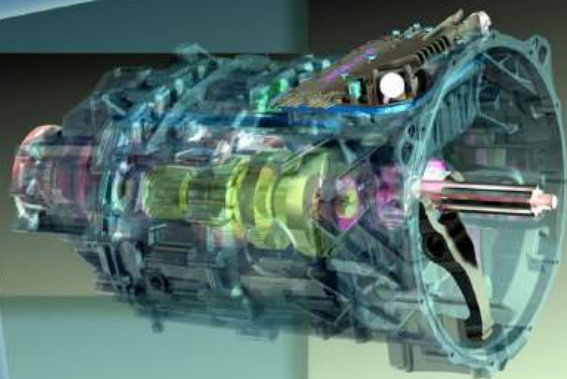
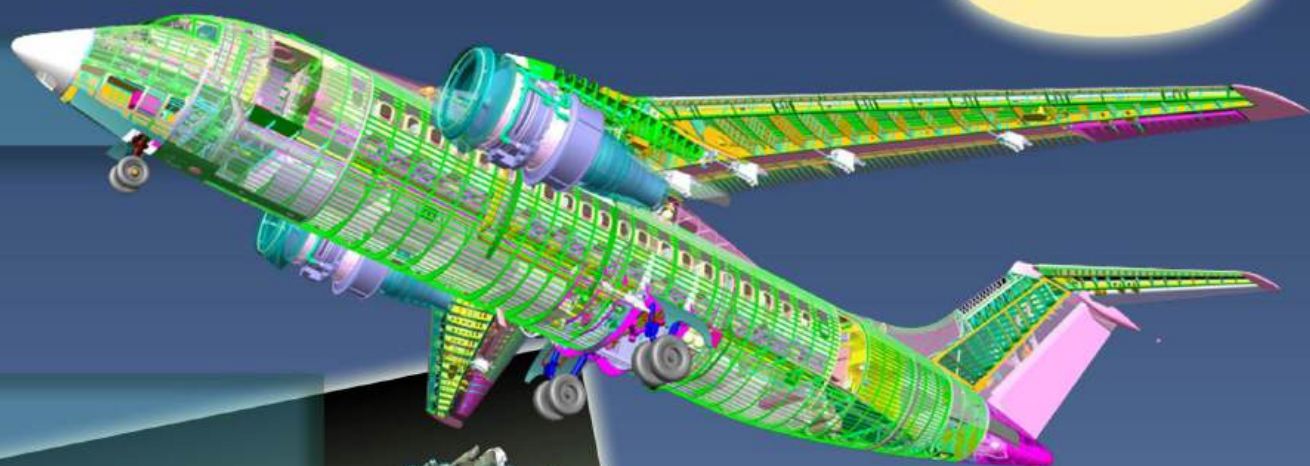


# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 2' 2022





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

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



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



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



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



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



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

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

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

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

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



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

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

## № 2 (186) 2022

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 «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

### Редакционная коллегия:

В. В. Бордоже, д-р техн. наук, проф., Координационный совет по информационным технологиям предприятий ОПК РФ; А. И. Громов, канд. хим. наук, НИУ «Высшая школа экономики»; В. В. Кондратьев, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева; Ю. Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф., МИЭМ НИУ ВШЭ; С. А. Матвеев, канд. техн. наук, ФГУП «ЦНИИмаш»; Е. И. Митрушкин, д-р техн. наук, проф., АО «НИИАА»; С. В. Назаров, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт»; М. А. Пирогова, канд. техн. наук, НИУ МЭИ; С. В. Попов, д-р техн. наук, Холдинг «Швабе»; А. Ф. Ронжин, д-р физ.-мат. наук, проф., Вычислительный центр им. А. А. Дородницына; П. О. Скобелев, д-р техн. наук, НАО «Группа компаний «Генезис знаний», СамГТУ; В. В. Соколов, канд. воен. наук, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; А. П. Солнцев, д-р воен. наук, проф., ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; Е. В. Судов, д-р техн. наук, проф., НИЦ САС-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 АИН 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 «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2022, № 2 (186). С. 1—68.

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

Подписано в печать 11.05.2022.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,9. Уч.-изд. л. 8,2.

Заказ 1993. Тираж 250 экз.

Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

Отпечатано: 101000, Москва,

Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.

ИП Кириченко Алексей Викторович.

Индекс 79378. 9 статей.

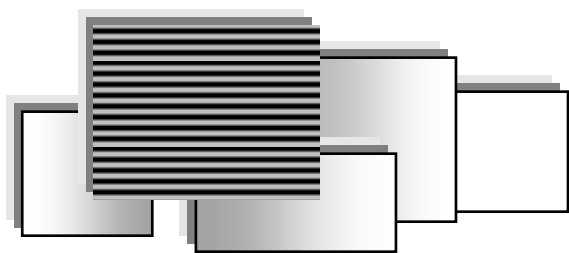
Статьи рецензируются.

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

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

- Семенов Г. Е. Разработка микросервисных архитектур для высоконагруженных систем информационного сопровождения подготовки производства ..... 2
- Волкова Г. Д., Пай Со, Тюрбеева Т. Б. Моделирование процессов жизненного цикла технических систем по методологии проектирования с помощью каталогов ..... 12
- Пирогова М. А., Лешихина И. Е., Краюшкин В. А. Технология дополненной реальности как эффективный инструмент применения пошаговых руководств и инструкций на рабочем месте ..... 23
- Федоров С. В. Структурный синтез схем инструментальных усилителей на основе мультидифференциальных операционных усилителей ..... 29
- Огородников И. И., Огородникова О. М. Перепрограммирование промышленных роботов в составе гибкой производственной системы ..... 36
- Сумароков С. В., Кечков А. А., Грошев Т. А., Кириченко С. О. Автоматизация сохранения и обработки результатов расчетов интегральной расчетной математической модели в системе "УРАНИЯ" ..... 41
- Воронцова И. В. Математическая модель объема конструкторской документации ..... 47
- Бутко А. О. Программные средства комплексного моделирования и вероятностного анализа надежности технических систем ..... 57
- ### Прикладные задачи применения информационных технологий
- Рыбальская Е. А. Применение технологических цепочек в информационно-техническом процессе учебно-познавательной деятельности ..... 65



## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 681.518.2

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_2\_2

EDN: BZFGDS

### РАЗРАБОТКА МИКРОСЕРВИСНЫХ АРХИТЕКТУР ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Г. Е. Семенов, канд. техн. наук

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

*Рассмотрен комплекс решений по определению структуры средств информационного сопровождения процессов подготовки производства сложных технических систем. Показаны сложности разработки архитектуры и организации взаимодействия между модулями системы. Проанализированы различные подходы к проектированию модулей высоконагруженных информационных систем. Исследован переход к микросервисной архитектуре, которая позволила увеличить масштабируемость системы и гибкость разработки.*

**Ключевые слова:** PLM, ERP, технологическое проектирование, производственное планирование, сложная техническая система, высоконагруженные системы, микросервисная архитектура.

Существует тенденция к фрагментации инфраструктуры корпоративного программного обеспечения, переход от монолитных систем уровня предприятия к узкоспециализированным, более привлекательным с точки зрения затрат на разработку и внедрения модулей. Такая дефрагментация вынуждает пересмотреть бизнес-процессы, связанные с традиционными хранилищами данных, подходы к созданию корпоративных систем и облачных вычислений. Эволюция облачных технологий, виртуализации и контейнеризации, являющимися строительными блоками современных приложений, делает переход на микросервисные архитектуры более привлекательным. Рассмотрены подходы к созданию таких сложных систем, методики подготовки и структуризации информации, декомпозиции монолитной структуры на модули, внедряемые в рамках различных бизнес-процессов функционирования предприятия. Важное внимание уделено анализу межпроцессного взаимодействия в системе планирования, для разных сервисов будем использовать различные подходы.

Система сопровождения процессов подготовки производства представляет собой типичное корпоративное приложение, имеющее гексагональную архитектуру. Бизнес-логика состоит из

модулей, каждый из которых представляет коллекцию доменов, примерами которых являются: модуль регистрации заказов, модуль редактирования конструкторско-технологической спецификации, модуль производственного планирования, модуль оптимизации производственных планов, мониторинга выполнения работ (рис. 1). Некоторые адаптеры управляют запросами посредством бизнес логики, включающими *REST API* и *Web UI*. Другие адаптеры посредством бизнес-логики обеспечивают доступ через протокол *SOAP* во внешние системы технологического проектирования и облачные сервисы предприятия.

С развитием системы, охватывающей большее число отделов предприятия, разрастанием базы данных, обнаружились огромные ограничения монолитной структуры. Возрастало количество кода на языках *JAVA*, *Python* и *C++*, а также увеличивались издержки на поддержку и быстрое развертывание используемой системы. Модульность особенно необходима при разработке сложных систем. Такие системы слишком обширны, чтобы быть понятными одному человеку. Требуется декомпозиция системы на различные модули, поддержка и разработка которых выполняется разными людьми и даже несколькими командами разработчиков.



Рис. 1. Монолитный архитектурный стиль системы планирования

В монолитных системах модульность обеспечивается с использованием различных конструкций языка, таких как пакеты *Java* или артефактами сборки, представляющими различные *JAR* файлы. С развитием системы усложняются зависимости между модулями, которые не всегда удается корректно разрешить при сборке проектов, что делает переход на микросервисные архитектуры более привлекательным. Микросервисная архитектура использует сервис как единицу модульной структуры. У сервиса свой независимый *API*, имеющий свои бизнес-требования и ограничения, который взаимодействует с внутренними объектами *Java*. Существуют преимущества использования сервисов в качестве строительных блоков, главное из которых — способность к более легкому независимому развертыванию и масштабированию.

Ключевая характеристика микросервисной архитектуры — сервисы имеют слабую связь и обмениваются информацией между собой через *API*. Одним из путей разрыва жестких связей между сервисами является то, что они имеют собственные базы данных [1]. Этим решением устраняется проблема разнородных требований к различным информационным слоям. Существует возможность выбирать между *SQL* и *NoSQL* решениями. Некоторые сервисы, например, модуль регистрации производственных заказов, имеют хорошо структурированную нормализованную информационную структуру, относительно небольшой объем данных, поток данных в этом сервисе не очень высок. Такие структуры требуют надежного поведения при выполнении транзакций, отвечают требованиям атомарности, непротиворечивости, изолированности и долговечности. Это позволит уменьшить вероятность неожиданного поведения системы и обеспечить целостность данных путем жесткого

определения того, как транзакции работают с данными. Напротив, некоторые высоконагруженные модули, например аналитические модули планирования партий изделий и модуль мониторинга технологических операций, требуют гибкой структуры данных, так как информационные структуры некоторых подразделений предприятия имеют неустоявшуюся структуру. Аналитические сервисы и сервисы мониторинга должны оперировать с быстро изменяющимися данными в реальном времени. Реляционные базы плохо масштабируются, с ними крайне сложно создавать распределенные хранилища. Гибким решением будет выбор *NoSQL*-решения, например хорошо масштабируемая база *MongoDB*. Постоянно дорабатываемая система требует от разработчиков оперативно изменять схему данных без координации с разработчиками других сервисов. Изолированность сервисов друг от друга позволяет производить эти операции безболезненно. Определение микросервисных архитектур и трехмерная модель масштабирования представлены в [2]. Масштабирование по оси *X* самый простой путь сбалансировать запросы и выполнить масштабирование монолитного приложения. Требуется запустить несколько идентичных сервисов и балансировщик нагрузки распределенных запросов в системе. Таким образом достигаем производительность и надежность приложения. Масштабирование по оси *Z* направляет запросы на основе атрибута запроса. Как и при масштабировании по оси *X* запускается несколько экземпляров сервисов, но каждый экземпляр ответственен за свое подмножество данных. Маршрутизатор, ответственный за сервис, использует атрибут для отправки запроса в нужный сервис. Таким атрибутом может быть деталь, заказ, пользователь, исходя из того, что

экземпляр сервиса планирования или оптимизации может выполнять вычислительные операции с подмножеством деталей, заказов или конструкторско-технологических единиц в ответственности конкретного технолога. Масштабирование по  $X$  и  $Y$  повышает производительность и надежность приложения, но не решает проблем, связанных со сложностью разработки и тестирования [1]. Масштабирование по  $Y$  подразумевает выполнение функциональной декомпозиции монолита на множество независимых сервисов (рис. 2).

Главным важным преимуществом микросервисной архитектуры является то, что она позволяет непрерывную разработку, развертывание больших сложных систем. В современных условиях поддержка продуктов на машиностроительных предприятиях требует быстрого реагирования на изменившиеся потребности предприятия, внесения частых и быстрых правок, развертывание обновленных версий продуктов. Внесение изменений в код должно иметь минимум последствий на работоспособности всей системы. Автоматизированное тестирование — ключевая практика для непрерывной разработки и развертывания. Так как каждый сервис микросервисной архитектуры относительно небольшой, модульные тесты легче писать и выполнять, в результате чего проще отследить ошибки. Имеется большое преимущество и при развертывании системы, так как каждый сервис можно развернуть независимо. При внесении частых изменений в код разработчикам разных сервисов не требуется координировать свои действия. Это дает возможность при поддержке системы планирования в инженерной организации иметь несколько команд независимых разработчиков, использующих различные языки программирования и средства разработки. Код приложения при таком подходе относительно небольшой и более читаем для каждого разработчика, каждый сервис требует относительно малое количество ресурсов и стартует быстро. Выход из строя

какого-либо сервиса не приводит к потере работоспособности системы. Например, выход из строя сервисов управления заказами не приводит к остановке планирования и редактирования конструкторской спецификации. Каждый сервис микросервисной архитектуры может быть подвергнут независимому масштабированию, репликации и партиционированию. Так ресурсоемкий сервис оптимизации планов, требующий решения задач неполиномиальной сложности с помощью генетических и симплексных алгоритмов, может быть реплицирован с помощью инструментов оркестрации контейнеров. Более того, каждый сервис может быть развернут на оборудовании наиболее подходящем к его требованиям, использовать тип СУБД наиболее адаптированный к его данным. Это совершенно другая практика, диаметрально противоположная использованию монолитных архитектур, где компоненты с различными требованиями к производительности процессора и требованиями к размеру оперативной памяти должны быть развернуты вместе. Микросервисные архитектуры имеют лучшую изоляцию проблемных модулей, утечки памяти в одном сервисе затрагивают лишь данный сервис, другие сервисы продолжают обработку запросов в штатном режиме. Еще одно преимущество — это свобода выбора технологий при разработке таких систем. Микросервисная архитектура стирает границы приверженности к конкретному технологическому стеку, так как разработчики нового сервиса свободны выбирать какой язык программирования или фреймворк подходят для данного сервиса. Микросервисная архитектура является архитектурным стилем. Она структурирует реализацию, как набор компонентов, которыми являются различные выполняемые *JAR*, *WAR* файлы. Компоненты являются сервисами, связанными различными сетевыми протоколами, позволяющими этим сервисам взаимодействовать между собой. Каждый сервис имеет свою гексагональную архитектуру со своей бизнес логикой.

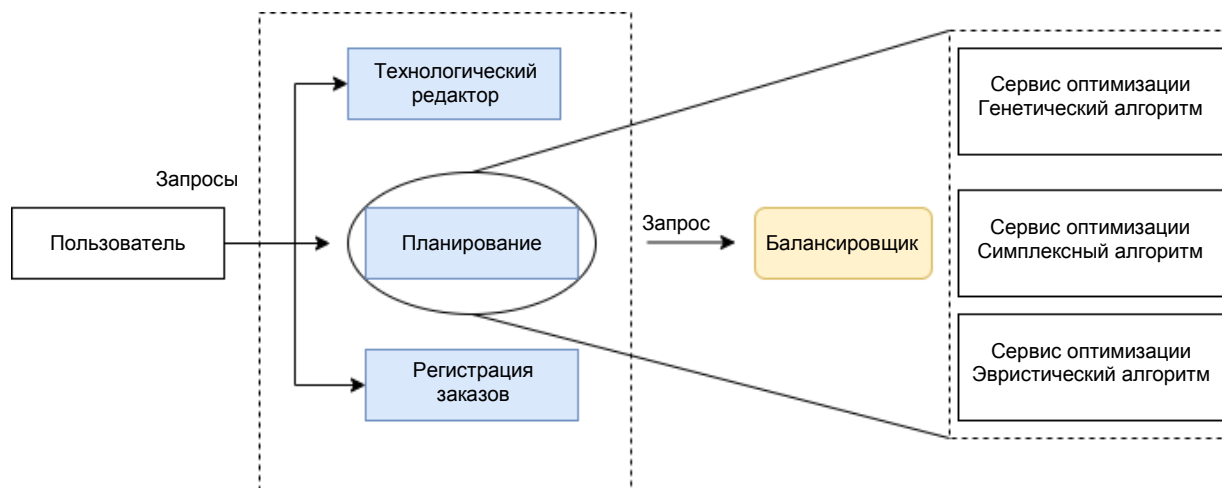


Рис. 2. Декомпозиции монолита на множество независимых сервисов

Представлена возможная микросервисная архитектура системы планирования как коллекция слабосвязанных, независимо развертываемых сервисов: сервис регистрации заказов, производственные планировщики, сервисы мониторинга, технологические редакторы (рис. 3). Взаимодействие может осуществляться коммуникационными механизмами: *REST API*, *GraphQL*, асинхронными сообщениями. *GraphQL* целесообразно использовать для агрегации данных, что увеличивает независимость front-end и back-end разработчиков.

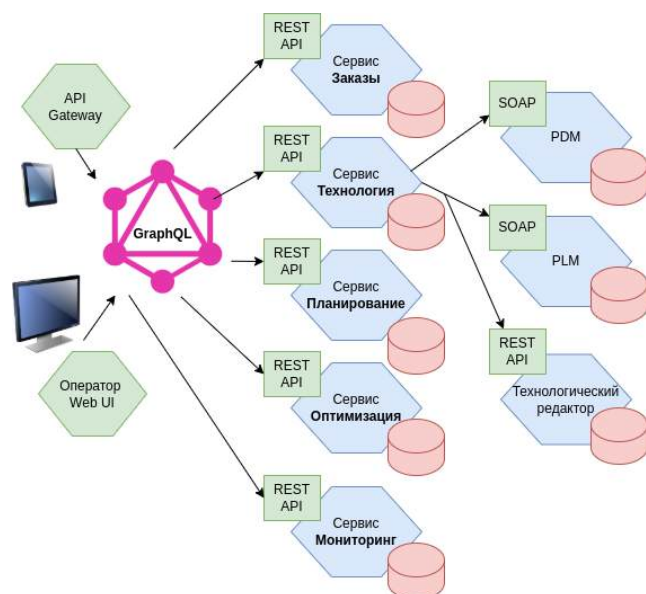


Рис. 3. Микросервисная архитектура системы планирования

Важным признаком микросервисной архитектуры является слабая связь между сервисами. Все взаимодействие происходит через *API*, который скрывает детали реализации. Это позволяет модифицировать сервисы, не затрагивая их потребителей. Слабая связанность — залог к более качественной поддержке, сервисы легче понимать, изменять и тестировать. Слабая связанность диктует необходимость взаимодействия сервисов, используя только их *API*, запрещая использовать базу данных. Это решает проблему, того что один сервис может удерживать блокировки в базе данных, препятствуя доступ другим сервисам. Также теперь модификация данных в одном сервисе не требует координации всех групп разработчиков. Обратной стороной независимости является дублирование данных в СУБД, также разработчикам следует отказаться от практики использования разделяемых библиотек. Следует пояснить, что размер микросервиса вытекает из логики декомпозиции: опираться на свою бизнес-логику, разрабатываться маленькой командой разработчиков с минимальным межкомандным взаимодействием за минимальное время. То, что модификация сервиса требует значительного вмешательства в другие сервисы, является признаком плохой

декомпозиции. Разработка микросервисной архитектуры требует идентификации сервисов и определения путей их взаимодействия.

При проектировании микросервисной архитектуры системы сопровождения большое внимание необходимо уделить архитектурному стилю взаимодействия между сервисами. Можно выделить две категории типов взаимодействия. Первое, является ли взаимодействие один—к—одному или один—ко—многим. Один—к—одному означает, что каждый клиент делает запрос только к одному сервису. Один-ко-многим — каждый запрос направлен ко множеству сервисов. Вторая категория подразумевает синхронность или асинхронность запросов. Синхронность определяет, то что клиент ожидает ответ от сервиса и может быть заблокированным во время ожидания. При асинхронной работе сервисы не блокируются. Важно понимать, что синхронный стиль запросов/ответов не связан с технологией межпроцессорного взаимодействия. Сервисы могут взаимодействовать либо с *REST API* или использовать брокеры сообщений. Даже, если два сервиса общаются, используя брокеры сообщений, клиентский сервис может быть заблокирован. Существуют различные типы взаимодействия. Публикация/подписка — клиент или другой сервис публикует сообщение, которое потребляет один или более сервисов. Публикация/асинхронный ответ — клиент публикует сообщение запроса и ждет некоторое количество времени для ответа заинтересованного сервиса. *API* или интерфейсы взаимодействия являются центральными при разработке программного обеспечения. Каждый модуль имеет интерфейс, который определяет набор операций, делая доступным функциональность, скрывая способы реализации *API* сервиса, определяет способы взаимодействия между клиентом и сервером и состоит из операций, имеющих имя и параметры, а также событий, публикуемых сервисом [3]. Для реализации системы планирования выбираем гибридный стиль организации взаимодействия между сервисами. Выполним разбиение монолита на функциональные модули, организуем взаимодействие между ними, а также интерфейсы взаимодействия операторов посредством стационарных компьютеров и мобильных устройств. Из логики взаимодействия вытекает синхронный стиль взаимодействия, оператор посредством *API* сервиса запрашивает необходимую информацию и должен получить ответ или информирование, о том что сервер не доступен. В качестве архитектурного стиля взаимодействия с клиентом выбран *REST API*. Ключевым концептом *REST API* является ресурс, который представляет простую сущность: заказ, спецификация, партия, производственный план. *REST* использует методы *HTTP* запроса (*GET*, *POST*, *PUT*, *DELETE*) для манипулирования ресурсом, для доступа к которому используется унифицированный указатель ре-



сурса. Так *GET*-запрос запрашивает ресурс, имеющий форму *JSON* или *XML* объекта. Проблемой использования *REST API* является его жесткая ориентация на бизнес объекты нашей системы. При проектировании нашей системы элементарные взаимодействия подразумевают операции, в которые вовлечены несколько объектов бизнес логики, что требует выполнения нескольких запросов. Другая проблема проектирования запросов — установить однозначное соответствие метода и ресурса. Так при выполнении операции над планом может быть применена операция изменения сроков выполнения или утверждение плана. Решением может быть декомпозиция ресурса для редактирования его конкретного аспекта или введения параметров в запрос. Также в случае слабого взаимодействия групп разработчиков недостаточность механизмов документированности *REST*-интерфейсов затрудняет поддержку таких систем. Клиентский сервис однозначно должен знать адреса запросов и формат сообщений, приходящих к нему. Еще одной проблемой является то, что различные группы сервисов требуют различных данных. Хорошим вариантом было бы использование механизмов поддержки объектно-ориентированных схем, использующих агрегацию данных на стороне сервера. Запросы к такому серверу должны возвращать только подмножество данных в соответствии с запрошенной схемой, в которой определены типы данных. Для решения этих проблем предложено помимо *REST* использовать *GraphQL*-сервер. *GraphQL*-сервер имеет спроектированную модель данных, которая может быть запрошена с сервера. Схема состоит из коллекции типов: скалярные типы, массивы, объектные типы. Схема должна напоминать традиционные для систем программирования объектно-ориентированные классы и несмотря на это концептуально являться функциями с аргументами, позволяющими *GraphQL* формировать возвращаемые данные. Использование схемы позволяет валидировать данные, определять запросы, которые разрешено выполнить, какие типы данных возвращать, учитывает связи между сущностями. Интегрируя множество систем, имеющих собственные *API*, *GraphQL* унифицирует их и скрывает сложность их реализации. Мигрируя с монолитной архитектуры,

*GraphQL API* помогает организовывать обмен сообщениями между несколькими сервисами в микросервисной архитектуре слиянием их в одну *GraphQL* схему. В то время как каждый микросервис определяет свою собственную схему и собственный эндпоинт *GraphQL* консолидирует все локальные схемы в одну глобальную. Описав некоторый сервис, спроектировав для него собственный *API*, чтобы делать к нему запрос, другие сервисы нашей архитектуры должны знать его точное сетевое расположение: *IP*-адрес и порт. В традиционных приложениях, запущенных на физическом оборудовании, сетевое расположение сервисов является статическим и оно может быть загружено при запуске сервиса из конфигурационного файла. Однако в современных облачных микросервисных архитектурах сервисы имеют динамически назначаемые адреса. Более того, в процессе функционирования некоторые экземпляры сервисов меняют адреса динамически из-за масштабирования реплик, перезапуска в результате сбоев или модификации. Для этого при написании сервисов предусмотрена возможность обнаружения сервисов с применением *Eureka Discovery Server*, *Consul*, *Zuul*, *Zookeeper*. При этом подходе сервисы регистрируются в базе данных сетевых соединений и обновляют информацию, когда экземпляр сервиса остановлен или перезапущен. Когда клиент обращается к сервису, механизм обнаружения получает список доступных экземпляров и направляет запросы к ним. Существует два пути применения механизмов обнаружения: сервисы напрямую взаимодействуют с реестром микросервисов (*Discovery service*) либо используют инфраструктуру развертывания *Kubernetes*. Архитектура системы планирования поддерживает два способа развертывания. Обязанность сервисов обнаружения назначать имена каждому микросервису, регистрировать их и отдавать адреса другим микросервисам. На рис. 4 показана принципиальная схема взаимодействия с сервисами обнаружения на примере технологического сервиса, сервиса планирования и сервисов оптимизации. Так клиент посредством технологического интерфейса может инициировать процесс планирования и оптимизации производственного плана в соответствии с выбранным алгоритмом.

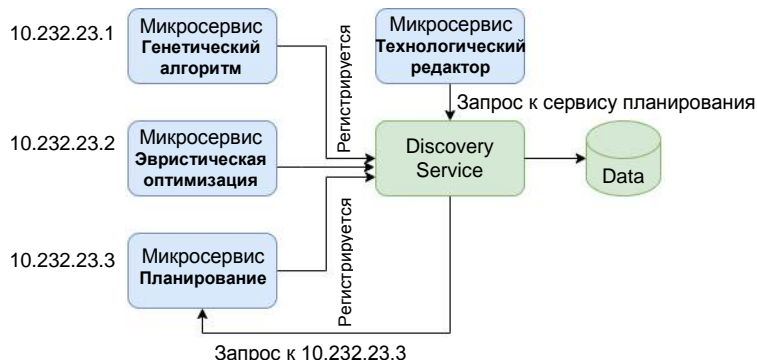


Рис. 4. Организация взаимодействия микросервисов с помощью механизмов обнаружения



При работе с синхронными механизмами приложений возникает проблема масштабируемости. Кроме того, при выходе из строя какого-либо сервиса запросы к нему будут завершаться ошибкой, либо приводить к длительной блокировке всю систему. Независимость сервисов достигается декомпозицией базы данных. Информация в базах подразумевает дублирование некоторых схем и их синхронизацию посредством обмена информацией между сервисами. Так, сообщение о регистрации производственного заказа должно поступить в технологические сервисы, технологические сервисы далее иницируют процесс планирования передачей соответствующего сообщения в сервис планирования и далее в сервис оптимизации. Более эффективным является в данном случае асинхронное взаимодействие сервисов. Такая система более масштабируема и отказоустойчива. Сервисы, ориентированные на активный обмен сообщениями, обычно используют брокеры сообщений (*Kafka*, *RabbitMQ*), которые используются как посредники между сервисами. Клиентский сервис делает запрос к другому сервису и ожидает ответа. Если экземпляр сервера готов ответить, то он отправляет ответ, иначе ответ будет получен в тот момент, когда работоспособность сервера будет восстановлена. Асинхронность обмена сообщениями гарантирует, что клиентский сервис не будет заблокирован в процессе ожидания. Брокеры сообщений являются посредниками на пути потока сообщений. Посылаемое сообщение записывается в очередь брокера сообщений и затем отправляется потребителю. Важное преимущество подобного подхода то, что отправитель не должен знать сетевой адрес потребителя. При выборе брокера сообщений существует множество факторов, включающих следующие особенности: поддержка языков программирования, сохранение порядка поступающих сообщений, сохранение сообщений на

диске на случай выхода брокера из строя, масштабируемость брокера, возможность запуска нескольких реплик, разбиение сообщений на партии и обеспечение параллельной работы группами консьюмеров. На (рис. 5) представлена схема взаимодействия между некоторыми сервисами в системе планирования. Технологические сервисы посредством отправки сообщений иницируют процесс планирования, сервисы планирования иницируют работу алгоритмов оптимизации. Минимизация синхронного взаимодействия во время обработки запросов, а также распараллеливание их обработки может быть достигнуто репликацией данных. Сервис хранит реплики данных, которые ему нужны для обработки запросов. Для поддержания реплики в актуальном состоянии сервис должен быть подписан на события, публикуемые в процессе обновления данных. Высоконагруженные процессы оптимизации на основе ресурсоемких математических алгоритмов могут быть реплицированы с помощью инфраструктуры развертывания.

Разработанная микросервисная архитектура дает возможность разорвать жесткие связи между сервисами и сделать их независимыми. Данный подход даст преимущество при развертывании. Получаем возможность развернуть сервисы в качестве дистрибутива, учитывающего особенности данного языка или технологии разработки. Минусом является недостаточная инкапсуляция технологического стека, невозможность ограничить ресурсы, потребляемые экземпляром сервиса, недостаточная изоляция при запуске нескольких экземпляров сервиса на одной машине, неспособность автоматизировать развертывание сервиса на конкретной машине.

Современные физические вычислительные ресурсы, используемые при развертывании системы, могут быть абстрагированы.

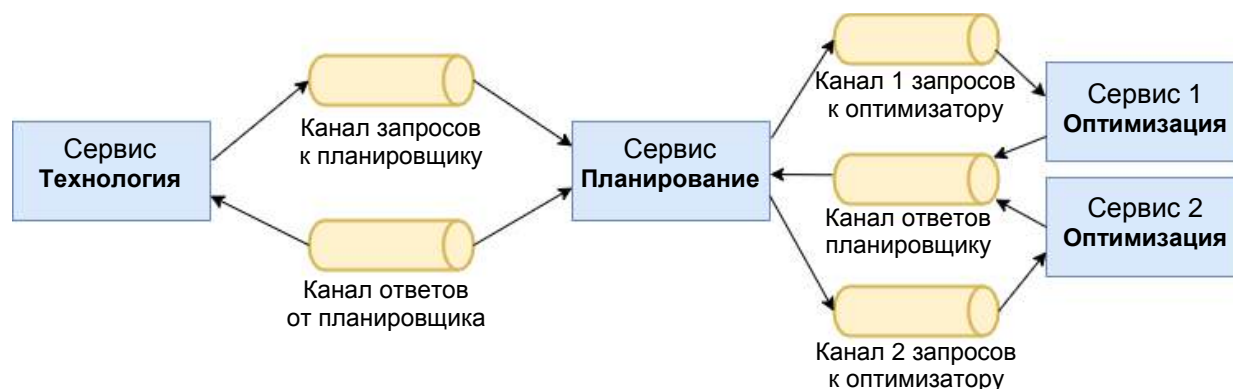


Рис. 5. Организация обмена асинхронными сообщениями между сервисами

Виртуальные машины, запущенные в высокоавтоматизированных облачных ресурсах, заменили физические машины. Контейнеры и более легковесные абстракции набирают популярность при развертывании (рис. 6).

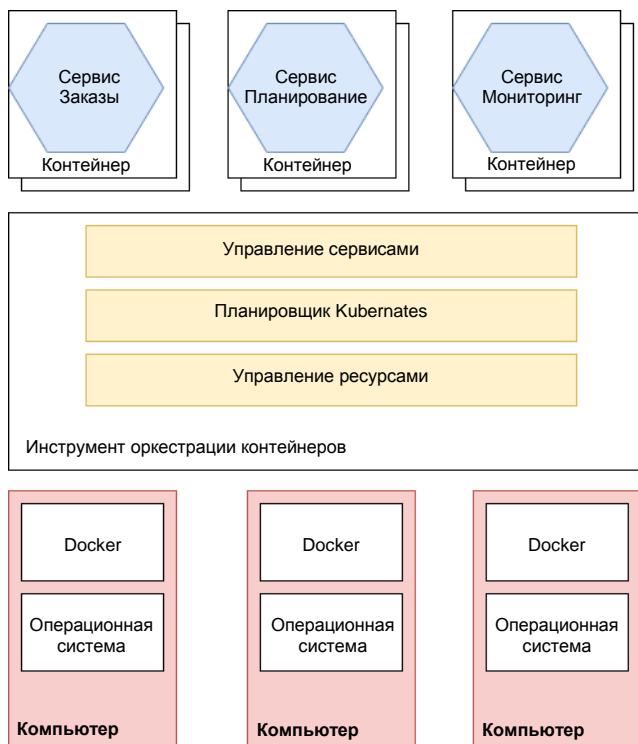


Рис. 6. Оркестрация контейнеров микросервисной архитектуры

Преимущество развертывания в виде образа виртуальной машины — это то, что ее образ содержит все зависимости технологического стека. Он устраняет все ошибки, вызванные требованиями к корректной установке и устанавливает программное обеспечение, необходимое для корректного функционирования сервиса. Виртуальный образ может быть развернут везде без модификации, процесс развертывания более надежен. Каждая виртуальная машина имеет фиксированное количество процессоров и памяти, и не может забирать ресурсы у других сервисов. Виртуальные образы могут быть заменены на контейнеры. Контейнеры — более современные и легковесные механизмы развертывания. С точки зрения процесса, запущенного в контейнере, нет никаких отличий от запуска на собственной машине. При создании контейнера можно определить процессорные ресурсы и требования к памяти, указав ее лимиты. Механизмы оркестрации, такие как *Docker Compose* и *Kubernetes*, выберут физическую машину для запуска контейнера и обеспечат то, что данная машина не будет перегружена. Для развертывания сервиса в виде

контейнера необходимо создать образ, представляющий файловую систему с приложением и библиотеками для его запуска. Проблема в том, что сервисы не существуют изолированно, они зависят от других сервисов, баз данных, брокеров сообщений. Хорошей практикой является использование механизмов оркестрации контейнеров. В случае тестирования нашей системы можно использовать *Docker Compose*. При этом мы ограничены использованием одной машины. Для надежного развертывания наших сервисов, эффективного масштабирования наших приложений, мониторинга их работоспособности мы воспользуемся оркестрацией наших контейнеров при помощи *Kubernetes*. *Kubernetes* — механизм оркестрации поверх *Docker*, который преобразует набор машин в общий пул ресурсов для запуска сервисов. Он пытается поддерживать требуемое число экземпляров сервисов даже в случае выхода их из строя. Также он выполняет следующие функции: управление ресурсами, планирование, управление сервисами. Данный механизм рассматривает кластер машин как совокупность процессорных ресурсов, памяти, дискового пространства. Он выбирает физическую машину для запуска ресурса на основании требований к контейнеру и доступности узла. Поддерживает концепцию именованных сервисов и их версию, которая привязывает сервис к микросервисной архитектуре. Производит мониторинг работоспособности существующих и поддерживает заданного количества реплик. Выполняет балансировку нагрузки, производит непрерывное обновление и откат к старым версиям.

Рассмотрим более подробно основные функциональные модули системы. Следует отметить, что все функциональные модули реализованы с поддержкой *WEB* — ориентированных технологий. Благодаря этому операторы помимо настольных компьютеров могут иметь доступ к интерфейсам системы посредством мобильных устройств. Для решения задач планирования на стратегическом и среднесрочном уровнях формируется модель заказа, которая упорядочивает данные, описывающие все выпускаемые изделия на период планирования и переходные периоды. Модель заказа (рис. 7) разделяет информацию о производственном заказе (портфеле заказов) на фрагменты. Эффективно представить модель плана в виде многоуровневой реляционной модели, на верхнем уровне которой представлен план, представляющий собой крупные проекты. На втором уровне хранятся, распределенные во времени более мелкие фрагменты проектов, называемые производственными заказами. На третьем — их детализация в виде спецификаций. Сервис управления заказами позволяет посредством реализованного *API* выполнять редактирование модели [4].

Управление заказами						
Добавить заказ		Утвердить				
Номер заказа	Наименование	Количество	Планируемая дата	Длительность	Фактическая дата	Статус
Блок Г (v3)						
00003-050122	Пуск 1	1	05-01-2022	100		Утвержден
00003-150422	Пуск 2	1	05-04-2022	100		Утвержден
00003-050722	Пуск 3	1	05-07-2022	100		Утвержден
Блок Г (v2)						
00002-011021	Пуск 1	1	01-10-2021	98		Выполняется
00002-010621	Пуск 2	1	01-06-2021	97	01-11-2021	Выполнен
00002-010921	Пуск 3	1	01-09-2021	97	01-07-2021	Выполнен
Детализация заказа						
Позиция	Наименование	Количество	Номер машины			
1	Сборка для КВИ	1	AAA-716			

Рис. 7. Интерфейс сервиса регистрации производственных заказов

Элемент информационной технологической системы должен иметь достаточно развитую структуру, отражающую конструктивную иерархию изделия, фрагменты которой задействуются на разных стадиях разработки. Состав элементов информационной модели, необходимых для решения задач на стадии подготовки производства, в том числе и производственных, различается. В ходе выполнения процессов проектирования на различных уровнях (изделие в целом, сборочные единицы, детали, поверхности) участвуют необходимые модели, соответствующие требуемому компоненту представления среды. При выполнении технологического

проектирования в каждом слое привлекаются необходимые модели аналогов, соответствующие компоненту производственной среды. Для решения данных задач применяется библиотека типовых технологических решений [4]. Формирование информационной модели информационно-технологической среды производственных систем — сложный и многоплановый процесс, для которого разработан комплекс технологических редакторов. Сервис управления конструкторско-технологической спецификацией позволяет посредством реализованного API выполнять редактирование технологической модели (рис. 8).

Редактор конструкторско-технологической спецификации								
	Код	Родитель	Наименование	Длительность	Ресурс	Партия	Цех	Тип
1	4259	4216	днище верхнее	18	0.00	1		
2	4264	4259	Цех73-2_8C810KM-0420-0	1	3.02	1	73	
3	4263	4264	Цех141-1_8C810KM-0420-0	1	0.00	1	141	
4	4262	4263	Цех51-1_8C810KM-0420-0	1	0.72	1	51	
5	4261	4262	Цех50-1_8C810KM-0420-0	3	2.82	1	50	
6	4260	4261	Цех73-1_8C810KM-0420-0	13	7.94	1	73	
7	4319	4260	шпилька	3	0.00	192		
8	4322	4319	Цех35-1_10-56-Ц-ОСТ131813-80&@85@	2	8.53	192	35	
9	4321	4322	Цех158-1_10-56-Ц-ОСТ131813-80&@85@	1	0.00	288	158	
10	4320	4321	Цех85-1_10-56-Ц-ОСТ131813-80&@85@	1	0.00	192	85	
11	4347	4260	шайба	3	0.00	6		
Добавить		Редактировать		Удалить				

Рис. 8. Интерфейс сервиса конструкторско-технологической спецификации



Модель решения для хранения спроектированных партий включает схему сетевой модели, заданной реляционными средствами для упорядочивания партий и определением реляционных связей с моделью заказа и конструкторско-технологического состава. Данная структура позволит разработать инструмент получения отчетов для рассчитанных партий и применение эффективных фильтров: партии по изделию, по заказу, отчет, структурирующий партии в соответствии с заказами. Задача планирования относится к классу задач неполиномиальной сложности, то есть не существует алгоритма, позволяющего найти оптимальный план за полиномиальное время. За процессы проектирования отвечает комплекс распределенных вычислительных сервисов использующих как точные методы решения на основе методов ветвей и границ, так и приближенные на базе эвристических и генетических алгоритмов. На стадии планирования производства необходимо построить модель, позволяющую увязать производственные маршруты в единую сеть. В результате работы алгоритма происходит объединение партий изделий в одну на основании экспертных данных, заложенных в конструкторско-технологическую модель. Таким образом, цехо-заходы разных заказов могут быть сгруппирова-

ны в одну партию. Вхождение партий в разные заказы можно отслеживать с помощью построенных отчетов [5]. API сервиса планирования возвращает данные клиенту для визуализации результатов в виде диаграмм Ганта (рис. 9).

Сложное техническое изделие обладает длительным циклом изготовления, большим количеством фрагментов производственного процесса (изготовления компонентов, сборки и испытаний). Алгоритмы полной оптимизации календарного планирования базируются на прямом переборе полного набора альтернатив. Такой подход приводит к необходимости практически недостижимого анализа экспоненциально растущего числа вариантов. Методы ветвей и границ не могут существенно снизить вычислительную сложность алгоритмов. Для некоторых задач оптимальным является применение эвристических приближенных алгоритмов решения задачи [6]. Независимо от выбора алгоритма оптимизации сервис требует организации параллельных и распределенных вычислительных процессов. Разработан комплекс интерфейсов, позволяющих выполнять мониторинг пошаговой оптимизации, отображать данные каждой итерации, показывая степень равномерности распределения загрузки производственных цехов (рис. 10).

### Результаты планирования

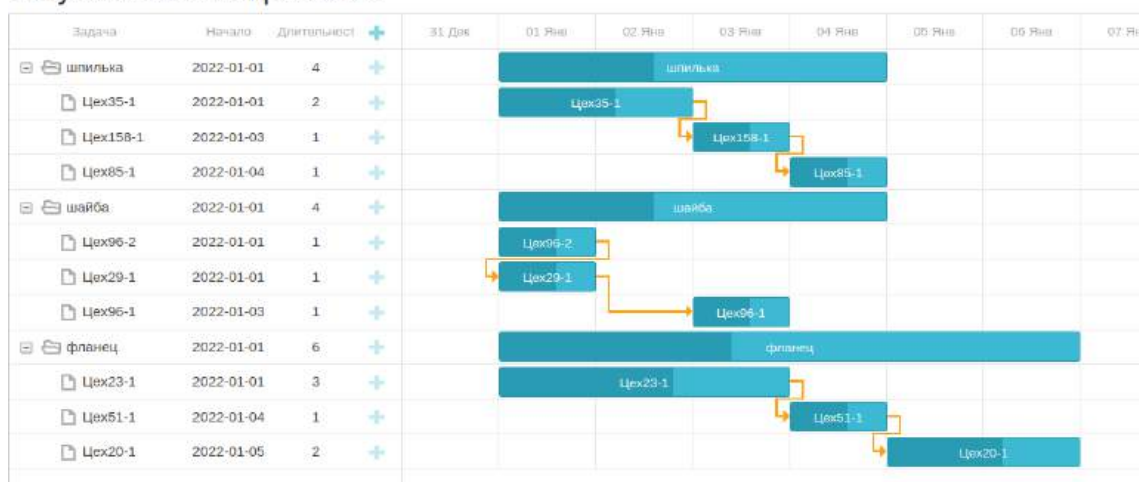


Рис. 9. Визуализация результатов работы сервиса планирования

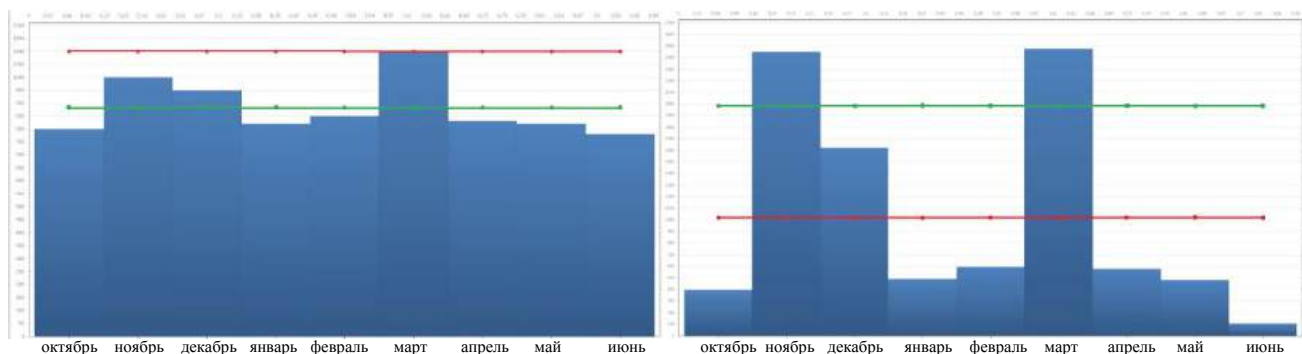


Рис. 10. Визуализация результатов оптимизации

**Литература**

1. Newman S. Building Microservices. O'Reilly, 2015. — 260 p.
2. Abott M., Fisher M. The art of Scalability, Scalable Web Architecture, Processes, and Organizations for the Modern Enterprise. 2nd edition. Addison Wesley, 2015. — 624 p.
3. Richardson C. Microservices Patterns, Manning Publications. 2018. — 520 p.
4. Семенов Г. Е., Цырков Г. А., Сычёв В. Н., Цырков А. В. Разработка архитектуры комплекса инфор-

мационных средств для подготовки производства сложных технических систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2014. № 3. С. 17—25.

5. Бутко А. О., Цырков Г. А. Специфика построения систем управления технологическими данными // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 1. С. 3—8.

6. Бутко А. О., Семенов Г. Е. Подготовка данных и реализация современных алгоритмов планирования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 3. С. 3—9.

## MICROSERVICE ARCHITECTURE DEVELOPMENT FOR HIGHLOAD INFORMATION MAINTAINANCE SYSTEM IN MANUFACTURING

G. E. Semenov

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

*This article describes the range of solutions to determine the structure of information support for pre-production processes of complex technical systems. Development problems and interaction between system modules complexity are indicated. Various approaches to designing modules of highload information systems are considered. The article indicates that transition to microservice architecture allows to increase scalability and development flexibility.*

**Keywords:** PLM, ERP, design for manufacturing, manufacturing scheduling, complex technical system, highload architecture, microservices.

---

Семенов Григорий Евгеньевич, доцент.  
E-mail: semenovge@mai.ru

Статья поступила в редакцию 26 января 2022 г.

УДК 004.4.22:658.512

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_2\_12

EDN: CGTZA

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КАТАЛОГОВ

Г. Д. Волкова, д-р техн. наук; Пай Со; Т. Б. Тюрбеева, канд. техн. наук  
Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Москва, Россия

*Представлены результаты моделирования процессов жизненного цикла технических систем с учетом системного подхода на базе методологии проектирования с помощью каталогов. Для данной методологии выполнено формальное описание основных процессов и дано формальное описание проектных решений как описаний взаимосвязанных процессов от функционирования до утилизации технических систем. Приведен фрагмент концептуальной модели для данной методологии.*

**Ключевые слова:** процессы жизненного цикла технических систем, формальное описание процессов и проектных решений, увязка процессов, концептуальная модель.

Цель деятельности предприятий, ориентированных на индивидуального клиента, заключается в удовлетворении запросов заказчика за счет своевременного изготовления и/или поставки требуемой высококачественной продукции. При этом понятие качества становится более субъективным, формируется в процессе взаимодействия производителя и потребителя, а уровень качества определяется степенью соответствия характеристик продукции тому набору требований, который предъявляет потребитель. Потребитель формулирует потребности, которые охватывают многообразие требований для разных фаз жизненного цикла продукции или технических систем — от функционального назначения, эргономики, упаковки до удобного использования, простоты обслуживания и утилизации.

Одним из главных инструментов совершенствования деятельности предприятий различных отраслей являются современные информационные технологии, в том числе технологии компьютерного сопровождения и поддержки продукции на всех фазах ее жизненного цикла (ЖЦ) как средства кардинального повышения качества и конкурентоспособности продукции [1].

В западной практике такие технологии получили название CALS-технологий. В России такие технологии называют ИПИ-технологиями (технологии непрерывной информационной поддержки изделия).

Дальнейшее развитие информационной поддержки изделия привело к новой концепции — концепции цифровых двойников (ЦД) изделий и их использования на всех фазах ЖЦ [2]. Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию реального объекта, которая ведет себя так же, как и реальный объект. Разработанные средства для управления ЖЦ изделия обеспечивают создание полноценной цифровой платформы, которая полностью поддерживает концепцию цифровых двойников на всех фазах,

что позволяет реалистично моделировать не только сами изделия, но и процессы их изготовления, сборки, эксплуатации, обслуживания и т. д.

Исходя из изложенных тенденций в области автоматизации производственных и управленческих процессов в промышленности необходимо отметить особую потребность в анализе и моделировании этих процессов в рамках жизненного цикла продукции с учетом системного подхода.

### Особенности процессов жизненного цикла технических систем в соответствии с методологией проектирования с помощью каталогов

В немецкой практике промышленного производства выделяют следующие укрупненные фазы ЖЦ [3, 4]: производство, распределение, применение, возобновление. При этом следует отметить, что фаза производства включает процессы: проектирование, подготовка производства, изготовление, сборка. Фаза распределения — это процессы транспортировки, хранения и сбыта. На фазе применения рассматривают рабочее состояние и простой; техническое обслуживание, ремонт. Фаза возобновления включает процессы завершения ЖЦ и рециклинга.

К особенностям ЖЦ по немецкой практике следует отнести:

- процессы ЖЦ разделены на группы, относящиеся как объекту создания и его моделей, так и к вспомогательным процессам (транспортировка и торговля);
- в каждой группе процессы увязаны, но их деление не всегда обосновано (разделение процесса изготовления на два процесса — изготовление деталей и сборка);
- в ЖЦ не входят исследовательские процессы по изучению потребностей и анализу осуществимости этих потребностей;
- в проектной деятельности интегрированы анализ потребностей (фаза формулировки зада-



чи), проектирование (функциональная фаза), конструирование (предметная фаза), технологическая проработка (технологическая фаза) (рис. 1);

- детальная методическая проработка фаз методологии проектирования с помощью каталогов;
- объемный справочный (иллюстративный) материал по каждой фазе проектирования.

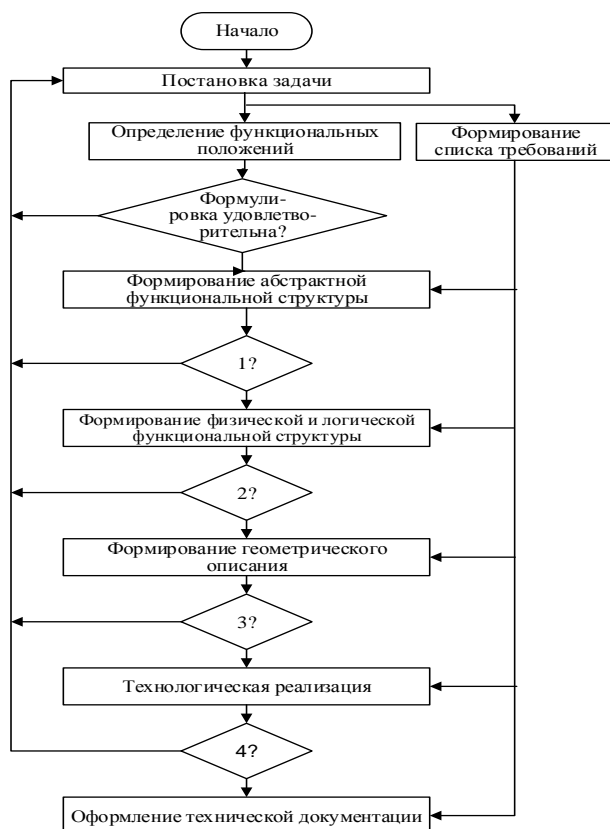


Рис. 1. Структура методологии проектирования с помощью каталогов [3]

На фазе формулировки задачи выполняются действия, связанные с уточнением постановки задачи, формулированием функциональных положений и формированием списков требований к технической системе в рамках его ЖЦ, т. е. описание перспективного функционирования с учетом заданных характеристик на всех фазах цикла.

На функциональной фазе выполняют формирование описания функционирования технической системы в виде совокупности функциональных структур разных уровней абстракции: абстрактной функциональной структуры (обобщенной) без привязки к физической реализации и функционально-физических (детализированных) структур, ориентированных на выбранные физические эффекты или явления.

Предметная фаза связана с геометрическим оформлением создаваемой конструкции в виде контурного (эскизного) и геометрически размерного представления создаваемого изделия

(с учетом формы, размеров и материала). Также проверяются технико-экономические и другие показатели полученного проектного решения. На данной фазе формируют конструкторскую модель и полное параметрическое описание изделия.

#### Формальное описание процессов жизненного цикла технических систем

В системном подходе предполагается рассмотрение объекта исследования как системы, определяющей целостный комплекс взаимодействующих элементов. По сути элементы этого комплекса, описывающего процессы ЖЦ технической системы (ТС), являются неоднородными, что обуславливает выделение разных множеств. В общем виде формальное описание системы можно представить как [5]:

$$S_1 = \langle Y, X, q(Y), q(X), R_1 \rangle,$$

где  $Y$  — это структура любого процесса жизненного цикла ТС;

$X$  — множество входных/выходных объектов процесса;

$q(Y)$  — множество разнородных свойств, описывающих элементы и структуру процесса ЖЦ;

$q(X)$  — множество разнородных свойств, описывающих множество объектов  $X$ ;

$R_1$  — совокупность связей между компонентами системы  $S_1$ .

Процесс выявления системы заключается в разделении предметной области на две составляющие — объект анализа (рассматриваемая система) и среда (набор существующих в пространстве и во времени объектов, которые воздействуют на систему). Формальное описание системы с учетом среды с точки зрения системного подхода принимает вид:

$$S_2 = \langle S_1, Z, R_2 \rangle,$$

где  $Z = \langle CR, q(CR), R_z \rangle$  — среда, включающая множество элементов  $CR$ , множество свойств элементов  $q(CR)$  и множество связей между компонентами этой среды  $R_z$ ;

$R_2$  — множество связей между компонентами системы  $S_2$ .

Множество элементов среды есть совокупность множеств разнородных объектов, характеризующих ресурсы среды, например, кадры, оборудование, документы и т. д.

Моделирование процессов ЖЦ ТС заключается в формировании взаимосвязанных моделей этих процессов и моделей управления этими процессами. При этом модели процессов ЖЦ ТС

формируются на основе анализа моделей соответствующих процессов по рассматриваемой практике, а модели управления процессами ЖЦ ТС формируются на основе метода взаимосвязанного семантического моделирования основных и управленческих процессов.

В рамках немецкой практики в качестве базовых процессов или фаз ЖЦ ТС рассматривают указанные обобщенные процессы. Рассмотрим их формальное описание с позиции системного подхода.

Формальное описание жизненного цикла технической системы можно представить:

$$LCn = \langle PRn, DS, EXn, LQn, R_n^{LC} \rangle,$$

где  $PRn$  — модель фазы производства;

$DS$  — модель фазы распределения;

$EXn$  — модель фазы эксплуатации;

$LQn$  — модель фазы возобновления;

$R_n^{LC}$  — увязка моделей фаз в рамках ЖЦ технических систем в соответствии с немецкой практикой.

Детально рассмотрим только две фазы: производство и применение.

**Формальное описание фазы производства.**

Модель фазы производства (индекс  $PRn$ ) на основе системного подхода и с учетом немецкой практики ( $n$ ) имеет вид:

$$PRn = \langle DKn, DTn, M1n, M2n, R_{PR} \rangle,$$

где  $DKn$  — модель процесса проектирования;

$DTn$  — модель процесса подготовки производства;

$M1n$  — модель процесса изготовления деталей;

$M2n$  — модель процесса сборки изделия;

$R_{PR}$  — множество связей между процессами на фазе производства.

1. **Формальное описание процесса проектирования.**

Модель процесса проектирования ЖЦ ТС (индекс  $DKn$ ) на основе системного подхода и теории систем имеет вид:

$$DKn^1 = \langle Y_{DKn}, X_{DKn}, q(Y_{DKn}), q(X_{DKn}), R_1^{DKn} \rangle,$$

где  $Y_{DKn} = \langle \overline{Y_{DKn}}, R_{DKn}^Y \rangle$  — структура процессов проектирования, в которой  $\overline{Y_{DKn}}$  — множество процессов проектирования,  $R_{DKn}^Y$  — множество связей между ними;

$X_{DKn} = \langle \overline{X_{DKn}}, R_{DKn}^X \rangle$  — система входных/выходных объектов или конструкторская модель ТС, в которой  $\overline{X_{DKn}}$  — множество входных/выходных объектов;

$R_{DKn}^X$  — множество связей между этими объектами;

$q(Y_{DKn}) = \bigcup_{i=1}^m q_i(Y_{DKn})$  — множество разнородных свойств процессов фазы проектирования;

$q(X_{DKn}) = \bigcup_{i=1}^m q_i(X_{DKn})$  — множество разнородных свойств, описывающих объекты или конструкторскую модель ТС;

$R_1^{DKn}$  — множество связей между процессами и объектами фазы проектирования.

С точки зрения теории систем, систему  $DKn^1$ , описывающую фазу проектирования ЖЦ ТС, необходимо дополнить параметрами, отражающими среду фазы.

Формально это можно представить путем введения в систему  $DKn^1$  дополнительных компонентов и отношений:

$$DKn^2 = \langle DKn^1, Z_{DKn}, R_2^{DKn} \rangle$$

или

$$DKn^2 = \langle Y_{DKn}, X_{DKn}, q(Y_{DKn}), q(X_{DKn}), R_1^{DKn}, Z_{DKn}, R_2^{DKn} \rangle,$$

где  $Z_{DKn} = \langle CR_{DKn}, q(CR_{DKn}), R_{DKn}^Z \rangle$  — структура, описывающая среду фазы проектирования (математические и др. модели, методы, требования к квалификации персонала, методики проектирования, программные и технические средства проектирования);

$CR_{DKn}$  — среда фазы проектирования;

$q(CR_{DKn})$  — множество свойств элементов среды;

$R_{DKn}^Z$  — множество связей между элементами среды;

$R_2^{DKn}$  — множество связей между элементами системы  $DKn^2$ .

2. **Формальное описание процесса подготовки производства.**

Модель процесса технологического проектирования или подготовки производства в ЖЦ ТС (индекс  $DTn$ ) на основе системного подхода и теории систем имеет вид:

$$DTn^1 = \langle Y_{DTn}, X_{DTn}, q(Y_{DTn}), q(X_{DTn}), R_1^{DTn} \rangle,$$

где  $Y_{DTn} = \langle \overline{Y_{DTn}}, R_{DTn}^Y \rangle$  — структура процессов технологического проектирования, в которой  $\overline{Y_{DTn}}$  — множество процессов технологического проектирования,  $R_{DTn}^Y$  — множество связей между ними;

$X_{DTn} = \langle \overline{X_{DTn}}, R_{DTn}^X \rangle$  — система входных/выходных объектов или *технологическая модель ТС*, в которой  $\overline{X_{DTn}}$  — множество входных/выходных объектов,  $R_{DTn}^X$  — множество связей между ними;

$q(Y_{DTn}) = \bigcup_{i=1}^m q_i(Y_{DTn})$  — множество различных свойств процессов технологического проектирования;

$q(X_{DTn}) = \bigcup_{i=1}^m q_i(X_{DTn})$  — множество различных свойств, описывающих объекты подготовки производства.

Систему  $DTn^1$  необходимо дополнить параметрами, отражающими среду фазы. Формально это можно представить путем введения в систему  $DTn^1$  дополнительных компонентов и отношений:

$$DTn^2 = \langle DTn^1, Z_{DTn}, R_2^{DTn} \rangle$$

или

$$DTn^2 = \langle Y_{DTn}, X_{DTn}, q(Y_{DTn}), q(X_{DTn}), R_1^{DTn}, Z_{DTn}, R_2^{DTn} \rangle,$$

где  $Z_{DTn} = \langle CR_{DTn}, q(CR_{DTn}), R_{DTn}^Z \rangle$  — структура, описывающая среду технологического проектирования (математические, информационные и др. модели и методы, требования к квалификации персонала, методики технологического проектирования, программные и технические средства технологического проектирования);

$CR_{DTn}$  — среда процесса технологического проектирования;

$q(CR_{DTn})$  — множество свойств элементов среды;

$R_{DTn}^Z$  — множество связей между элементами среды;

$R_2^{DTn}$  — множество связей между элементами системы  $DTn^2$ .

3. *Формальное описание процесса изготовления деталей.*

Модель процесса изготовления деталей в рамках ЖЦ ТС (индекс  $M1n$ ) на основе системного подхода и теории систем имеет вид:

$$M1n^1 = \langle Y_{M1n}, X_{M1n}, q(Y_{M1n}), q(X_{M1n}), R_1^{M1n} \rangle,$$

где  $Y_{M1n} = \langle \overline{Y_{M1n}}, R_{M1n}^Y \rangle$  — структура процесса изготовления, в которой  $\overline{Y_{M1n}}$  — множество

процессов изготовления,  $R_{M1n}^Y$  — множество связей между ними;

$X_{M1n} = \langle \overline{X_{M1n}}, R_{M1n}^X \rangle$  — система входных/выходных объектов или производственная модель ТС, в которой  $\overline{X_{M1n}}$  — множество входных/выходных объектов,  $R_{M1n}^X$  — множество связей между этими ними;

$q(Y_{M1n}) = \bigcup_{i=1}^m q_i(Y_{M1n})$  — множество различных свойств процессов изготовления деталей;

$q(X_{M1n}) = \bigcup_{i=1}^m q_i(X_{M1n})$  — множество различных свойств, описывающих объекты или производственную модель ТС;

$R_1^{M1n}$  — множество связей между процессами и объектами.

Систему  $M1n^1$ , описывающую процесс изготовления ЖЦ ТС, необходимо дополнить параметрами, отражающими среду:

$$M1n^2 = \langle M1n^1, Z_{M1n}, R_2^{M1n} \rangle$$

или

$$M1n^2 = \langle Y_{M1n}, X_{M1n}, q(Y_{M1n}), q(X_{M1n}), R_1^{M1n}, Z_{M1n}, R_2^{M1n} \rangle,$$

где  $Z_{M1n} = \langle CR_{M1n}, q(CR_{M1n}), R_{M1n}^Z \rangle$  — структура, описывающая среду изготовления (технологические карты, требования к квалификации персонала, программные средства, технологическое и производственное оборудование и средства оснащения, материалы);

$CR_{M1n}$  — среда изготовления;

$q(CR_{M1n})$  — множество свойств элементов среды изготовления;

$R_{M1n}^Z$  — множество связей между элементами среды;

$R_2^{M1n}$  — множество связей между элементами системы  $M1n^2$ .

4. *Формальное описание процесса сборки изделия.*

Модель процесса сборки изделия в рамках ЖЦ ТС (индекс  $M2n$ ) на основе системного подхода и теории систем имеет следующий вид:

$$M2n^1 = \langle Y_{M2n}, X_{M2n}, q(Y_{M2n}), q(X_{M2n}), R_1^{M2n} \rangle,$$

где  $Y_{M2n} = \langle \overline{Y_{M2n}}, R_{M2n}^Y \rangle$  — структура процессов сборки, в которой  $\overline{Y_{M2n}}$  — множество про-



цессов сборки,  $R_{M2n}^Y$  — множество связей между ними;

$X_{M2n} = \langle \overline{X_{M2n}}, R_{M2n}^X \rangle$  — система входных/выходных объектов или *производственно-сборочная модель ТС*, в которой  $\overline{X_{M2n}}$  — множество входных/выходных объектов,  $R_{M2n}^X$  — множество связей между ними;

$q(Y_{M2n}) = \bigcup_{i=1}^m q_i(Y_{M2n})$  — множество разнородных свойств процессов сборки;

$q(X_{M2n}) = \bigcup_{i=1}^m q_i(X_{M2n})$  — множество разнородных свойств, описывающих объекты или производственно-сборочную модель ТС;

$R_1^{M2n}$  — множество связей между процессами и объектами сборки изделия.

Систему  $M2n^1$ , описывающую процесс сборки, необходимо дополнить параметрами, отражающими среду фазы. Формально это можно представить путем введения в систему  $M2n^1$  дополнительных компонентов и отношений:

$$M2n^2 = \langle M2n^1, Z_{M2n}, R_2^{M2n} \rangle$$

или

$$M2n^2 = \langle Y_{M2n}, X_{M2n}, q(Y_{M2n}), q(X_{M2n}), R_1^{M2n}, Z_{M2n}, R_2^{M2n} \rangle,$$

где  $Z_{M2n} = \langle CR_{M2n}, q(CR_{M2n}), R_{M2n}^Z \rangle$  — структура, описывающая среду сборки (технологические карты, требования к квалификации персонала, программные средства, технологическое оборудование и средства оснащения),  $CR_{M2n}$  — среда сборки;

$q(CR_{M2n})$  — множество свойств элементов среды;

$R_{M2n}^Z$  — множество связей между элементами среды;

$R_2^{M2n}$  — множество связей между элементами системы  $M2n^2$ .

**Формальное описание фазы применения.**

Модель фазы применения (индекс  $EX$ ) на основе системного подхода и с учетом немецкой практики имеет вид:

$$EX = \langle FN, TO, RE, R_{EX} \rangle,$$

где  $FN$  — модель процесса функционирования ТС;

$TO$  — модель процесса технического обслуживания ТС;

$RE$  — модель процесса ремонта ТС;

$R_{EX}$  — множество связей между процессами на фазе применения.

Каждый из процессов данной фазы формально описывается аналогичным способом.

#### Модели изделия и модели знаний об изделии

При проектировании технических систем будем различать следующие модельные представления:

- представление изделия (или И-модель);
- представление знаний (или К-модель) [4, 6].

Модель, представляющая изделие  $(u_n^k)$ , —

это модель создаваемой технической системы, позволяющая получить достаточное описание ее структуры и функционирования для  $k$ -го уровня абстракции на  $n$ -м этапе создания (таблица) [6].

Сопряжение или отображение модельных представлений изделия на практике осуществляется на основе опыта и интуиции проектировщиков.

Модель, представляющая знания об изделии  $(k_{nj}^k)$ , — это модель системы знаний, позволяющая описать поведение технической системы для  $k$ -го уровня абстракции на  $n$ -м этапе создания с  $j$ -й точки зрения.

Соответствие уровней абстракции ТС и ее моделей

Уровень абстракции ТС	Обозначение	Наименование модели
Функциональные потребности (ФП)	ВшФМ	Внешняя функциональная модель
Потребительские свойства и качества (ПС)	ВшСМ	Внешняя структурная модель
Функционально-логическая структура (ФС)	ВнФМ	Внутренняя функциональная модель
Принцип действия (ПД)	ФФМ	Функционально-физическая модель
Конструкторско-технологическое решение (КТ)	КТМ	Конструкторско-технологическая модель
Параметрическое описание (ПР)	ПМ	Параметрическая модель

Соотношения между модельными представлениями [6]:

$$u_n^k \rightarrow \{k_{nj}^k\}.$$

Интегрированные концептуальные модельные представления [6]:

- по точкам зрения на фиксированном уровне и этапе

$$k_n^k = \bigcup_j k_{nj}^k$$

- по этапам создания на фиксированном уровне

$$k^k = \bigcup_n k_n^k$$

- по уровням абстракций

$$k = \bigcup_k k^k.$$

Проектные решения как объекты формально представлены следующим образом (в модели процесса проектирования):

$X_{DKn} = \langle \overline{X_{DKn}}, R_{DKn}^X \rangle$  — система входных/выходных объектов или конструкторская модель ТС, в которой  $\overline{X_{DKn}}$  — множество входных/выходных объектов,  $R_{DKn}^X$  — множество связей между ними.

При этом  $\overline{X_{DKn}}$  — совокупность проектных решений/модельных представлений на всех фазах проектирования по методологии с помощью каталогов (методологии Рота — фаза формулировка задачи, функциональная фаза, предметная фаза, технологическая фаза).

$$\overline{X_{DKn}} = \langle FZM, FM, PM, TM, R_{DKn} \rangle,$$

где  $FZM$  — проектное решение/модель фазы формулировки задачи;

$FM$  — проектное решение/модель функциональной фазы;

$PM$  — проектное решение/модель предметной фазы;

$TM$  — проектное решение/модель технологической фазы.

Каждая фаза делится на этапы и подэтапы, которым соответствуют определенные проектные решения.

Так для фазы формулировки задачи это членение формально можно описать следующим образом [4]:

$$FMZ = \langle FP, ST, R^{FMZ} \rangle,$$

где  $FP$  — модель функциональных положений создаваемой ТС и соответствует внешней функциональной модели;

$ST$  — модель системы требований к создаваемой ТС и соответствует внешней структурной модели;

$R^{FMZ}$  — множество связей между ними на фазе.

Система требований по методологии Рота формируется с трех точек зрения — ТС как "черный ящик", ТС с учетом окружения, ТС с позиции ее жизненного цикла (как определенные "масштабы" для анализа ТС).

Формально это можно представить как

$$ST = \langle ST1, ST2, ST3, R_{FMZ}^{ST} \rangle,$$

где  $ST1$  — модель требований для ТС как "черный ящик";

$ST2$  — модель требований для ТС с учетом окружения;

$ST3$  — модель требований для ТС с позиции ее ЖЦ;

$R_{FMZ}^{ST}$  — множество связей между ними на фазе.

Функциональная фаза по методологии Рота может быть выполнена по двум разным (независимым) методикам — на основе элементной структуры ТС (1) и на основе потоковой структуры ТС (2), что формально описывается в виде:

$$FM = \langle FM1, FM2 \rangle,$$

где  $FM1$  — проектное решение/модель создаваемой ТС на основе элементной структуры;

$FM2$  — проектное решение/модель создаваемой ТС на основе потоковой структуры.

Проектное решение/модель по каждой методике включает увязанные проектные решения по трем этапам функциональной фазы.

Для элементной методики совокупность проектных решений формально описывается соотношением:

$$FM1 = \langle AFS, VFS, GFS, R_{FM}^{FM1} \rangle,$$

где  $AFS$  — модель ТС в виде абстрактной функциональной структуры;

$VFS$  — модель ТС в виде векторной функциональной структуры;

$GFS$  — модель ТС в виде геометрической функциональной структуры;

$R_{FM}^{FM1}$  — множество связей между ними.

Модель ТС в виде абстрактной функциональной структуры соответствует внутренней функциональной модели и с позиции системного подхода формально может быть описана:

$$AFS^1 = \langle X^A, q(X^A), R_{FM}^A \rangle,$$

где  $X^A$  — множество абстрактных функциональных элементов;

$q(X^A)$  — свойства абстрактных функциональных элементов;

$R_{FM}^A$  — множество связей между элементами.

Модель ТС в виде векторной функциональной структуры соответствует функционально-физической модели и с позиции системного подхода формально может быть описана соотношением:

$$VFS^1 = \langle X^V, q(X^V), R_{FM}^V \rangle,$$

где  $X^V$  — множество векторных функциональных элементов;

$q(X^V)$  — свойства векторных функциональных элементов;

$R_{FM}^V$  — множество связей между элементами.

Модель ТС в виде геометрической функциональной структуры соответствует также функционально-физической модели и формально может быть представлена в виде:

$$GFS^1 = \langle X^G, q(X^G), R_{FM}^G \rangle,$$

где  $X^G$  — множество структурно-функциональных элементов;

$q(X^G)$  — свойства структурно-функциональных элементов;

$R_{FM}^G$  — множество связей между элементами.

Для *поточковой методики* совокупность решений формально описывается следующим образом:

$$FM2 = \langle ADP, DPIQ, PSh, R_{FM}^{FM2} \rangle,$$

где  $ADP$  — модель ТС в виде абстрактной диаграммы потоков;

$DPIQ$  — модель ТС в виде диаграммы потоков с интенсивностно-количественными величинами;

$PS$  — модель ТС в виде принципиальной схемы;

$R_{FM}^{FM2}$  — множество связей между ними.

Модель ТС в виде абстрактной диаграммы потоков соответствует *внутренней функциональной модели* и с позиции системного подхода формально может быть описана:

$$ADP^1 = \langle Y^A, q(Y^A), R_{FM}^A \rangle,$$

где  $Y^A$  — множество обобщенных процессов (передача вещества/энергии/информации);

$q(Y^A)$  — свойства обобщенных процессов;

$R_{FM}^A$  — множество связей между обобщенными процессами.

Модель ТС в виде диаграммы потоков с интенсивностно-количественными величинами с позиции системного подхода формально имеет вид:

$$DPIQ^1 = \langle Y^{IQ}, q(Y^{IQ}), R_{FM}^{IQ} \rangle,$$

где  $Y^{IQ}$  — множество идеальных функций (с учетом частных функциональных положений);

$q(Y^{IQ})$  — свойства идеальных функций;

$R_{FM}^{IQ}$  — множество связей между идеальными функциями.

Модель ТС в виде принципиальной схемы с позиции системного подхода формально может быть описана:

$$PSh^1 = \langle Y^{Sh}, q(Y^{Sh}), X^{Sh}, q(X^{Sh}), R_{FM}^{Sh} \rangle,$$

где  $Y^{Sh}$  — множество действий/функций;

$q(Y^{Sh})$  — свойства действий;

$X^{Sh}$  — множество условных структурно-функциональных элементов, реализующих действия;

$q(X^{Sh})$  — свойства условно структурно-функциональных элементов;

$R_{FM}^{Sh}$  — множество связей между действиями и элементами.

Формальное описание модельных представлений ТС с учетом уровней их абстракции в процессе проектирования позволило увязать процессы ЖЦ ТС. Графически эти связи приведены на рис. 2.

Формально это можно описать следующим образом.

Расширенное описание процесса функционирования ТС фиксируется в виде совокупности объектов процесса проектирования:

$$EX^2 \rightarrow X_{DK}.$$

Расширенное описание процесса функционирования ТС с учетом уровней абстракции фиксируется в виде совокупности объектов процесса проектирования:

$$EX^2(FP) \rightarrow X_{DK},$$

$$EX^2(ST) \rightarrow X_{DK},$$

$$EX^2(AFS / ADP) \rightarrow X_{DK},$$

$$EX^2(VFS \& GFS / DPIQ \& PSh) \rightarrow X_{DK},$$

$$EX^2(PM) \rightarrow X_{DK}.$$



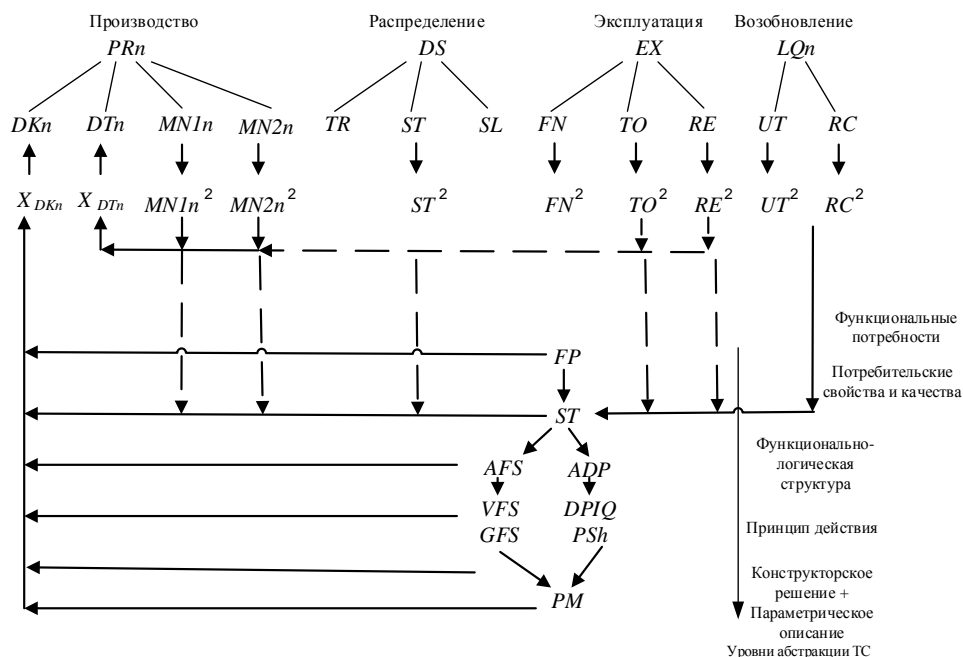


Рис. 2. Связи составляющих процессов ЖЦ ТС в соответствии с немецкой практикой

Расширенное описание процессов эксплуатации, утилизации и производства ТС фиксируется в виде совокупности объектов процесса технологического проектирования

$$RC^2 \rightarrow X_{DT}, UT^2 \rightarrow X_{DT}, RE^2 \rightarrow X_{DT}, \\ TO^2 \rightarrow X_{DT}, MN1n^2 \rightarrow X_{DT}, MN2n^2 \rightarrow X_{DT}.$$

Кроме того, расширенное описание процессов эксплуатации, утилизации, производства и хранения в явном или неявном виде фиксируется в описании требований к создаваемой ТС (ST)

$$RC^2(ST) \rightarrow X_{DK}, UT^2(ST) \rightarrow X_{DK}, \\ RE^2(ST) \rightarrow X_{DK}, \\ TO^2(ST) \rightarrow X_{DK}, MN1n^2(ST) \rightarrow X_{DK}, \\ MN2n^2(ST) \rightarrow X_{DK}.$$

#### Концептуальное моделирование проектных задач

Применяя метод и методику концептуального моделирования [7, 8], можно сформировать модель знаний об изделии [9—11].

Концептуальная модель 1-го рода включает множество предметных категорий (понятий), множество статических отношений на них (основная концептуальная структура) и множество динамических ограничений на них в виде системы предметных зависимостей 1-го рода.

Особенностью формирования системы предметных зависимостей 1-го рода является процесс разложения сложных зависимостей

на простые. При этом используются базовые и типовые алгоритмические конструкции: последовательность, итерация, альтернатива, цикл, переключатель.

Особенностью формирования основной концептуальной структуры является поуровневое разложение сложных предметных категорий на простые и фиксация между ними связей как на одном уровне, так и на разных уровнях. Каждый уровень разложения соответствует определенному классу — цикл, процесс, задача, компонент, объект, признак.

Концептуальная модель в целом формируется как увязки этих структур в виде матричной диаграммы, в которой столбцы — предметные категории, строки — предметные зависимости.

На рис. 3 приведен фрагмент системы предметных зависимостей 1-го рода, отражающий декомпозицию процесса формирования множества версий модельных представлений изделия (проектных решений) на текущей фазе. На фрагменте — каждый блок является предметной зависимостью 1-го рода с уникальным идентификатором внутри и метками конструкций снаружи.

Предметная зависимость 1-го рода (блок а4.2) раскрывается как циклическая конструкция, в которой осуществляется формирование  $j$ -й версии модельного представления изделия (МПИ) на текущей фазе. Каждая итерация раскрывается как последовательность.

В первом блоке (а6.1) последовательности происходит фиксация версии МПИ на текущей фазе с помощью счетчика цикла. Формирование текущей версии МПИ на текущей фазе осуществляется в зависимости от наименования фазы в блоке (а6.2).

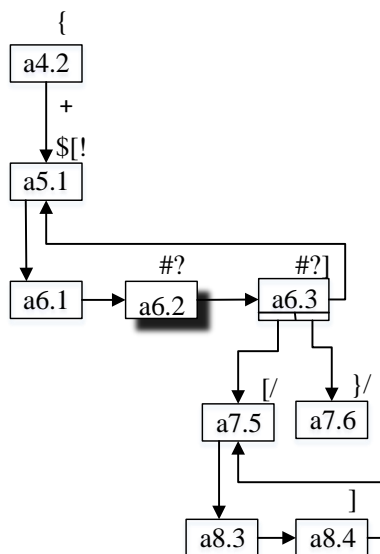


Рис. 3. Формирование множества версий модельных представлений изделия на текущей фазе

Третий блок (a6.3) последовательно раскрывается как альтернативная конструкция, которая обуславливает продолжение цикла в зависимости от оценки текущей версии МПИ на текущей фазе.

При неудовлетворительной оценке выполняется переход к новой версии МПИ на блок (a8.3) как изменение счетчика цикла. При этом в блоке (a8.4) фиксируется текущая версия МПИ на текущей фазе в массиве версий. В случае удовлетворительной оценки текущая версия МПИ на текущей фазе фиксируется как окончательная в массиве без продолжения цикла (a7.6).

На рис. 4 приведена основная концептуальная структура, которая отражает родословную предметных признаков, которыми оперирует проектировщик, от самого сложного понятия — ЖЦ изделия.

Увязка концептуальных конструкций выполняется в виде матричной диаграммы, фрагмент которой приведен на рис. 5.

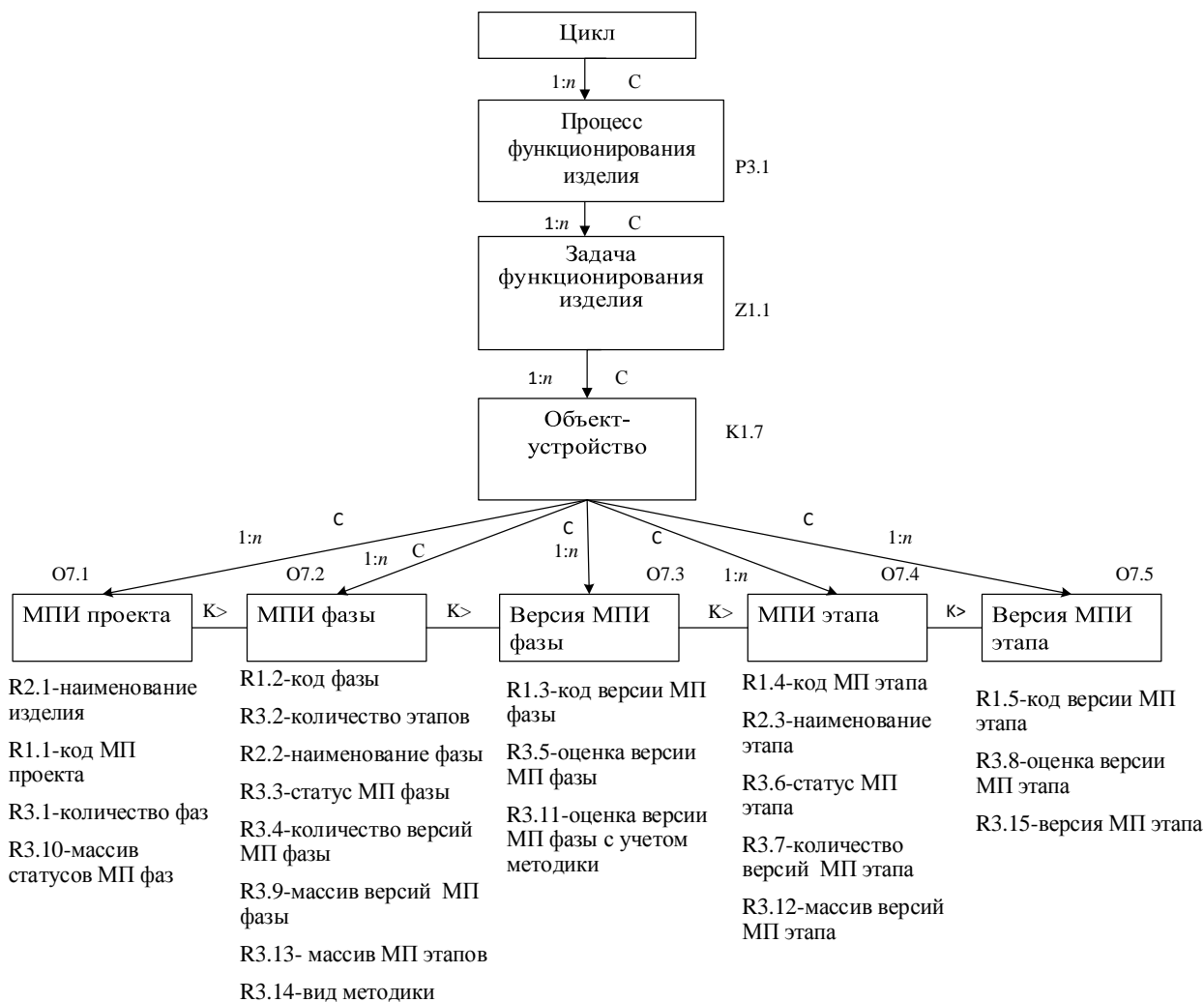


Рис. 4. Обобщенная диаграмма основной концептуальной структуры

	СЧ	АИ	ФИ	ФЦ		Примечание
Код ПЗ-1	Количество версий МПИ фазы (R3.4)	Код версии МПИ фазы (R1.3)	Оценка версии МПИ фазы (R3.5)	Массив версий МПИ фазы (R3.9)	Код фазы (R1.2)	
a4.2				{	.	
a5.1	!		\$	[	.	
a6.1	.	*			.	
a6.2		.	*		.	Раскрытие через альтернативу
a6.3	?			#]	.	
a7.5	/			[	.	
a8.3	*				.	
a8.4			+	*]	.	
a7.6	/		+	*}	.	Возврат

Рис. 5. Фрагмент матричной диаграммы концептуальной модели в целом

### Заключение

Методология проектирования с помощью каталогов является обобщенным представителем в немецкой практике проектной деятельности.

Очень тщательная методическая проработка всех фаз и этапов данной методологии позволила выявить и формально описать связи процессов ЖЦ технических систем через соотношение компонентов и/или описаний процессов.

Модельные представления технических систем в проектировании раскрывают процесс функционирования этих систем на разных уровнях абстракции с учетом возможных ограничений от других процессов ЖЦ.

Сопряжение модельных представлений технических систем для разных уровней абстракции возможно при семантическом моделировании процессов ЖЦ в виде концептуальных моделей по методологии автоматизации интеллектуального труда.

### Литература

1. Судов Е. В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. — М.: ООО Издательский дом "МВМ", 2003. — 264 с.
2. Mikel Armendia, Mani Ghassempouri, Erdem Ozturk, Flavien Peysson. Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle. — М.: "Springer", 2019. — 298 p.
3. Pom K. Конструирование с помощью каталогов / пер. с нем. В. И. Борзенко и др. под ред. Б. А. Березовского. — М.: Машиностроение, 1995. — 420 с.

4. Пай Со, Волкова Г. Д. Особенности моделирования изделия на начальной фазе по методологии проектирования с помощью каталогов: сб. мат. междунар. науч.-практ. конф. "Современная наука: инновации, проекты, инвестиции" (г. Уфа, 9 ноября 2017 г.) — Иркутск: "Научное партнерство "Алекс", 2017. С. 40—45.

5. Волкова В. Н., Козлова В. Н. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 2004. — 616 с.

6. Пай Со, Волкова Г. Д. Модели изделия в проектной деятельности. Сб. мат. междунар. науч.-практ. конф. "Научные аспекты современных исследований" (г. Новосибирск, 7 июля 2017 г.). — Иркутск: "Научное партнерство "Алекс", 2017. С. 72—77.

7. Волкова Г. Д. Методология автоматизации интеллектуального труда. — М.: Янус-К, 2013. — 102 с.

8. Волкова Г. Д. Концептуальное моделирование проектных задач: учеб. пособие. — М.: ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", 2016. — 117 с.

9. Тюрбеева Т. Б., Волкова Г. Д., Пай Со. Особенности моделирования системы знаний об изделии по методологии проектирования с помощью каталогов // СТИН. Научно-технический журнал. 2019. № 8. С. 2—4.

10. Пай Со, Волкова Г. Д., Тюрбеева Т. Б. Моделирование проблемно-ориентированных знаний, зафиксированных в научных публикациях и технической документации // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS (MK-661). Сб. мат. XXXVII Междунар. науч.-практ. конф. 30 ноября 2019 г. — Пенза: Международный центр научного сотрудничества "Наука и просвещение". 2019. С. 38—41.

11. Tyurbееva T. B., Volkova G. D., So P. Simulation of a System of Product Knowledge Based on Catalog-Assisted Design // ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, Allerton Press, Inc., 2020. V. 40. № 1. P. 55—57.

---

## MODELING TECHNICAL SYSTEMS LIFE CYCLE PROCESSES USING CATALOG DESIGN METHODOLOGY

G. D. Volkova, Paing Soe, T. B. Tyurbееva  
Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia

*The article presents the results of modeling the life cycle processes of technical systems taking into account the system approach based on the design methodology using catalogs. For this methodology, a formal description of the main processes was made, and a formal description of the design solutions as descriptions of the interconnected processes from operation to utilization of technical systems. A fragment of the conceptual model for this methodology is given.*

**Keywords:** processes of the life cycle of technical systems, formal description of processes and design solutions, process linkage, conceptual model.

---

**Волкова Галина Дмитриевна**, заведующая кафедрой информационных технологий и вычислительных систем.

E-mail: cog-par@yandex.ru

**Пай Со**, соискатель кафедры информационных технологий и вычислительных систем.

E-mail: paingsoe89@yandex.ru

**Тюрбеева Татьяна Борисовна**, доцент кафедры информационных технологий и вычислительных систем.

E-mail: itvs@list.ru

*Статья поступила в редакцию 10 февраля 2022 г.*



УДК 338.364

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_2\_23

EDN: CLDVEK

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОШАГОВЫХ РУКОВОДСТВ И ИНСТРУКЦИЙ НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ

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

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

*Рассмотрены возможности эффективного промышленного применения технологии дополненной реальности для разработки пошаговых руководств и инструкций.*

**Ключевые слова:** дополненная реальность, пошаговые руководства, платформы дополненной реальности, носимые устройства дополненной реальности.

Предприятия дискретного производства работают в высококонкурентной, сложной, строго регулируемой среде, в условиях глобализации производства, поэтому ищут способы выполнения производственных операций быстрее, точнее, экономичнее, рациональнее. Такие способы требуют меньших затрат на разработку, внедрение и обслуживание, способствуют увеличению дохода, а также позволяют оптимизировать и улучшать основную деятельность, сводить к минимуму ошибки, время простоя, время обучения и все другие формы затрат и потерь.

Один из важных макроэкономических факторов, с которыми в этих условиях сталкиваются промышленные компании, — это растущий разрыв в квалификации работников. Одна из самых больших проблем, с которыми сталкиваются руководители производственных предприятий — это возможность стимулировать рост числа квалифицированных рабочих, находясь при этом под давлением рынка рабочей силы и в условиях оптимизации (по сути, сокращения) числа работников. Значительное число технических квалифицированных работников приближается к пенсионному возрасту, они уносят с собой незаменимый опыт рационального, отлаженного, эффективного выполнения производственных операций. Как указывается в отчете консалтинговой компании Deloitte: "В течение следующего десятилетия только в обрабатывающей промышленности США потребуется заполнить почти 3,5 миллиона рабочих мест, при этом существующий дефицит навыков приведет к тому, что 2 млн из этих рабочих мест останутся незаполненными" [1].

Увеличение сложности изделий и процессов дискретного производства, а также увеличение количества конфигураций и настроек выпускаемых изделий, выпуск изделий "под заказ" — все это означает, что требования к квалификации рабочих, занятых на такого рода производствах, как минимум не снижаются, а новым

сотрудникам, сторонним подрядчикам и перераспределенным работникам не хватает навыков и опыта, необходимых для замещения высококвалифицированных рабочих предпенсионного возраста. Ранее подготовка новых рабочих, их обучение в целях "перехвата" знаний и умений непосредственно на производстве, не в учебных заведениях, основывалась на применении "института наставничества", когда молодой рабочий на длительный период, от нескольких недель до полугода патронировался высококвалифицированным рабочим, закреплялся за ним для получения навыков выполнения сложных операций непосредственно на рабочем месте. Молодой кандидат при этом многократно копировал с той или иной степенью тщательности действия высококвалифицированного сотрудника. Такое наставничество в условиях современного производства приводит, с одной стороны, к снижению производительности труда основного работника, вынужденного отвлекаться на выполнение функций наставника дополнительно к основным функциям рабочего места. С другой стороны, время, которое молодому кандидату отводится на обучение у наставника — это прямые потери использования рабочей силы предприятия, поскольку в это время обучаемый не производит никакой дополнительной продукции.

Описанная выше ситуация заставляет высокотехнологичные промышленные предприятия разрабатывать новые стратегии для повышения эффективности работы, повышения производительности труда, повышения конкурентоспособности и способности выпуска лучших или инновационных изделий, передачи знаний и умений высококвалифицированных рабочих. Основная стратегия в этом случае — это решение задачи применения информационных технологий, поскольку собственно передача знаний и навыков рационального безошибочного выполнения рабочих операций — это задача эффективной передачи полноценной производственной инфор-

мации от одного субъекта деятельности ("квалифицированный рабочий", "эксперт") другому субъекту. В условиях глобальных ограничительных мероприятий по COVID-19 при построении таких стратегий возрос интерес к применению технологии дополненной реальности (AR), позволяющей передавать информацию непосредственно для восприятия и усвоения за счет "наложения" дополнительного информационного потока на воспринимаемую реальную "картинку".

Применение технологии дополненной реальности помогает восполнять пробелы в производственных навыках и влияет на будущие работы, расширяя возможности критически важных человеческих ресурсов. Дополненная реальность заменяет устаревшие, неточные или несуществующие печатные инструкции актуальными, оцифрованными контекстуальными знаниями и инструкциями в режиме реального времени там, где они больше всего нужны, в реальном контексте повседневной рабочей среды. Специалистами IT для задач промышленного применения в последние полтора-два года все чаще отмечается трансформационный потенциал дополненной реальности в помощи промышленным производственным участкам за счет повышения производительности, сокращения брака и переделок, повышения безопасности и соответствия предъявляемым требованиям, а также за счет рациональной передачи знаний и умений при выполнении производственных заданий (формирование и применение базы знаний предприятия).

В [2] авторы уже частично касались проблемы применения технологии дополненной реальности для эффективной передачи знаний и формирования с использованием дополненной реальности информационных активов предприятия, однако, поскольку основная тема работы лежала в другой плоскости, ограничились лишь самым кратким упоминанием. Рассмотрим теперь более подробно состояние применимости технологии дополненной реальности (AR) для информационного сопровождения выполнения производственных операций, требующих высокой квалификации работника. Проанализируем какие наиболее освоенные методы использования AR существуют и какие системы и платформы AR, имеющиеся на рынке промышленных информационных технологий, позволяют наиболее эффективно подходить к решению задач передачи передового опыта непосредственно при осуществлении производственной деятельности.

### В центре внимания — рабочие инструкции

Информационное сопровождение выполняемых работ в технологии дополненной реальности (ДР) — это прежде всего предоставление работнику всех необходимых актуальных данных в наиболее удобном для восприятия форма-

те (изображение, звук) на каждом из шагов выполняемого им производственного процесса, рабочей операции. По сути ДР в этом случае заменяет обращение к рабочей пошаговой инструкции и/или к "советам специалистов" в случае возникающих на том или ином шаге затруднений. Сами приемы использования ДР при этом не должны требовать от пользователей никаких дополнительных знаний и умений. Интерфейс работы с дополненной реальностью должен быть максимально дружелюбен и прост, проще, чем просмотр рабочих инструкций и чтение карт пошагового выполнения операций.

Технологии ДР в дискретном производстве используют на таких этапах жизненного цикла изделия (ЖЦИ), когда важно представление изделий, разрабатываемых сложных сборок, узлов и агрегатов в виде 3D-твердотельных моделей [3]. К таким этапам ЖЦИ, где уже используют технологию AR, относят маркетинг и послепродажное сопровождение, включая ТОиР. Рабочие операции на этих этапах, выполняемые с применением визуализационных эффектов AR, существенно повышают информационную насыщенность и служат в конечном счете значительному повышению качества выполняемых действий, будь то демонстрация будущего виртуального изделия в контексте обстановки эксплуатации или AR-демонстрация валидных последовательностей сборочно-разборочных операций на базе 3D-моделей цифровых двойников в ремзонах сложных объектов. Это промышленное применение AR-технологии обусловлено тем, что в качестве главной информационной AR-компоненты контента приложения используются 3-мерные модели САПР.

Информационное сопровождение рабочих операций на этапе производства — изготовление, сборка, монтажные операции, настройка, инспекция качества изготовления и т. д., не требует обязательного наличия САПР-моделей для лучшего понимания отдельных операций. Так например, квалифицированный оператор станка с ЧПУ не нуждается в представлении 3D-модели изготавливаемой детали, эта информация уже выдана на станок. Качество получаемого изделия, скорость работы и правильность контроля режимов обработки, то есть то, что и определяет квалификацию работника не зависит от того, есть ли перед оператором 3D-модель или 2D-чертеж того, что должно получиться. Квалификация определяется следующими параметрами: умением вовремя реагировать на изменения параметров функционирования оборудования, мастерством, с которым производятся наладочные операции, умением владения установочным и вспомогательным инструментом, оптимизацией маршрутов перемещения внутри рабочей зоны и т. д. Следовательно, AR-содержание возможного информационного сопровождения производственных операций на этапе изготовления ЖЦИ состоит в том, чтобы

как можно точнее и нагляднее сохранить и передать особенности действий квалифицированного работника, специфику его манипуляций и перемещений в рабочей зоне. Именно такой контент, а не 3D-модели, составляет основу AR-пошаговых руководств и инструкций на рабочем месте, которые в будущем послужат (для многих компаний уже сейчас служат) основой эффективной подготовки квалифицированных рабочих, средством сохранения знаний и умений, элементом формирования банка знаний предприятия.

Получение такого контента предполагает аппаратуру для "захвата" особенностей выполнения производственных заданий, рациональных действий, манипуляций и перемещений, которая минимально отягощала бы исполнителя — квалифицированного рабочего/эксперта. Такая аппаратура должна иметь "на борту" средства записи видео, звука, не требующие никаких специальных знаний и умений, быть максимально приближенной к исполнителю, носимой, но при этом не затрудняющей применение, "hands free". К таким классам устройств относятся только так называемые Head Mounted Device (HMD) класса "eyewear", по-русски: "очки дополненной реальности". Ни планшеты, ни смартфоны любой степени "продвинутой" такой аппаратурой служить не могут, так как не освобождают руки исполнителя при применении им самим устройств для "захвата" особенностей своих действий, а при освобождении рук от устройства и фиксации его "где-то рядом" не позволяют получать "захват" действий в виде "от первого лица", то есть получаемая запись не соответствует именно тому, что реально видел перед собой оператор во время записи его квалифицированных действий. Контент, "захва-

ченный" в HMD, необходимо далее передать в среду редактирования и сохранения для преобразования полученного контента в виде пошаговых фрагментов, снабдить их необходимыми пояснениями, аннотациями. Квалифицированный рабочий для выполнения этих действий уже не привлекается и эти действия не сказываются на его производительности, он освобожден от дальнейших работ по созданию AR-рабочих пошаговых инструкций, среда редактирования и сохранения ("облако контента") находится при этом вне HMD работника, а в момент передачи "захваченного" контента и HMD и среда редактирования и сохранения должны быть в сети передачи данных. Для удобства работ такая сеть передачи данных подразумевается беспроводной, работающей по протоколам беспроводной цифровой связи.

После завершения редактирования AR-пошаговую инструкцию опубликовывают на адресуемом сетевом ресурсе, для доступа к которому работникам—"новичкам" уже можно использовать как HMD, так и планшеты/смартфоны.

Схематично систему разработки и распространения AR-пошаговых руководств и рабочих инструкций можно представить так, как показано на рисунке.

Как следует из приведенной схемы, в структуре AR-платформы для задач сохранения знаний и умений квалифицированных рабочих при выполнении ими операций рабочего места, важными являются три компонента:

- устройства "захвата" контента;
- облачная среда;
- программное обеспечение, реализующее связь между захватом, редактированием, публикацией и визуализацией опубликованного контента.



Схема разработки AR-пошаговых руководств

### Устройства захвата контента

В настоящее время существует небольшая номенклатура устройств HMD типа "eyewear", подходящих для решения поставленной задачи, а именно:

- Microsoft HoloLens;
- Microsoft HoloLens2;
- Trimble XR10;
- realwear HMT1;
- realwear HMT1Z1;
- Vuzix M300 Smart Glasses;
- EPSON Moverio Pro BT-2000.

Все перечисленные устройства имеют функцию звукозаписи и голосового управления, есть функции фотографирования и видеозаписи.

Только в Microsoft HoloLens, Microsoft HoloLens2 и Trimble XR10 встроен алгоритм точной локализации пользователя в пространстве помещения с сантиметровой точностью отслеживания, что существенно облегчает выполнение задачи трассировки перемещения пользователя.

Только Trimble XR10, realwear HMT1, realwear HMT1Z1 и EPSON Moverio Pro BT-2000 выполнены в промышленном исполнении, а realwear HMT1 и realwear HMT1Z1 сертифицированы для применения в тяжелых условиях эксплуатации, имеют промышленный класс звуко-, пыле-, влаго-защищенности. Эти модели можно применять на производственных участках, не нарушая требования ОТ и ТБ.

Realwear HMT-1 и realwear HMT1Z1 "исторически" и конструктивно (монокуляры, непрозрачные устройства, по сути — эквиваленты планшетов с монтированием в наголовный обод) не предназначались для вывода стереоскопических голограмм и, следовательно, не давали "BAU"-эффекта при визуализации 3D-объектов. Основное их предназначение — это визуализация AR-контента в виде 2D-изображений, видео-фрагментов, текста. Отсюда происходит и название субкласса AR-технологии, применяемой в realwear HMT1 и realwear HMT1Z1 — Assisted Reality, а не Augmented Reality. И сами устройства компании realwear позиционируются как устройства assisted reality.

В соответствии с классификацией, используемой компанией Microsoft, технологические решения по дополненной реальности в устройствах Microsoft HoloLens, Microsoft HoloLens2 и Trimble XR10 носят название "Mixed Reality", а по отношению к самим устройствам применяют название "очки смешанной реальности".

### Облачная среда

Облачная среда захвата и сохранения AR-информации об исполнении рабочих операций должна обеспечивать:

- разработку с использованием "облачного" ресурса пошаговых AR-инструкций и руководств по выполнению рабочих операций;
- применение специальных технических средств автоматической пошаговой фиксации выполнения рабочих операций, освобождающих оператора от необходимости дополнительных трудозатрат;
- автоматическое сохранение аудио- и видеокментариев при фиксации выполнения рабочих операций ("AR-захват действий эксперта");
- автоматическое сохранение информации о перемещениях в рабочем пространстве при фиксации выполнения рабочих операций ("AR-захват действий эксперта", "AR-траектории");
- доработку на облачном ресурсе — редакторе "захваченного AR-контента" полученной информации, преобразование в пошаговую AR-инструкцию;
- возможность добавления в облачном редакторе дополнительной поясняющей текстовой, визуальной и аудиоинформации для каждого шага разрабатываемой пошаговой AR-инструкции;
- размещение на облачном ресурсе результата — пошаговой AR-рабочей инструкции — для получения ее по сети на устройство конечного пользователя, реализующего все функциональные возможности разработки: пошаговое воспроизведение контента, трансляция комментариев, показ AR-траекторий.

### Предложения на рынке ПО для AR-пошаговых руководств и инструкций на рабочем месте

Многие компании-разработчики ПО в последние два года активизировались на рынке ПО для AR-инструкций рабочего места.

Наиболее часто упоминаются следующие "лейблы":

- Ubimax Frontline xInspect и xAssist — для работы с Vuzix M300 и Microsoft HoloLens;
- Proceedix Work instructions и Inspections and checklists — для работы с Vuzix M300 и realwear HMT1;
- DOZUKI (бывш. iFixit, Калифорнийский политехнический университет) — для работы с планшетами, без объявленной поддержки HMD;
- Parsable Connected Worker® — для работы на мобильных устройствах;
- TaqTile Manifest — для работы с HoloLens, HoloLens2;
- RE'FLEKT ONE и RE'FLEKT Remote — для работы с Microsoft HoloLens, realwear HMT1;
- UPSKILL Skylight — для работы с широкой номенклатурой HMD, включая Microsoft HoloLens, realwear HMT-1, Vuzix и EPSON Moverio;

- Vuforia Expert Capture — для работы с Microsoft HoloLens, Microsoft HoloLens2, realwear HMT1, realwear HMT1Z1, визуализация инструкций — через Vuforia View;

- Vuforia Instruct — визуализация инструкций через Vuforia Vantage;

Лидерами по присутствию на рынке AR-рабочих инструкций и пошаговых руководств являются три компании, вендоры ПО из приведенного списка:

- TeamViewer, владеющая брендом Ubimax Frontline;

- RE'FLEKT, владеющая брендами RE'FLEKT ONE и RE'FLEKT Remote;

- PTC, владеющая брендами Vuforia Expert Capture и Vuforia Instruct.

8 февраля 2022 года было объявлено о приобретении компанией PTC продуктовой линейки RE'FLEKT и группы разработчиков RE'FLEKT. За счет такого приобретения компания PTC существенно упрочила свои лидерские позиции как разработчика платформ AR и как самого крупного игрока на рынке систем разработки AR-рабочих инструкций и пошаговых руководств.

Среди самых известных и успешных компаний в Российской Федерации, которые разрабатывают AR-приложения хоть как-то соответствующие классу пошаговых рабочих AR-инструкций, по результатам 2020—2021 гг. можно назвать следующих представителей:

- Платформа XR ("Иксар") компании АО "ИнлайнГрупп". В состав платформы входят модули, позволяющие спроектировать для осваиваемого бизнес-процесса графическое пошаговое руководство для работников "в поле" и в цехе, использующих различные мобильные и HMD-устройства.

- Платформа дополненной реальности, разработанная компанией СИБУР Диджитал для предприятий группы СИБУР. Платформа "Удаленный эксперт AR" разрабатывалась как технический комплект для проведения AR-конференций и удаленного информационного AR-сопровождения выполнения инспекционных проверок оборудования для производства мономеров. В качестве носимого оборудования на рабочих местах используют Android-устройства в промышленном исполнении и допускающие применение в условиях открытых произ-

водственных площадок, низких температур — realwear HMT-1 и EPSON Moverio Pro 2000.

- Компания ООО "ИТОРУМ ЭМ АР" реализует AR-платформу собственного производства Itorum MR, на базе применения которой компанией выполнен ряд проектов производственного использования технологии AR в том числе и для разработки технологических карт выполнения рабочих производственных операций. В качестве устройств AR компания использует монокуляры assisted reality — realwear HMT1.

### Заключение

Сложилась ситуация и предпосылки для эффективного промышленного применения технологии дополненной реальности при разработке пошаговых руководств и инструкций, что позволяет уже сейчас эффективно и быстро, без сложного программирования, без использования 3D-моделей, создавать AR-пошаговые инструкции и руководства, и предоставлять эти приложения дополненной реальности непосредственно исполнителю на рабочем месте за счет мобильных устройств и специализированных носимых устройств дополненной реальности.

Наиболее полно функционал разработчика, простой пользовательский интерфейс и коммуникационные возможности представлены в составе платформ-рыночных лидеров сектора AR, к которым относятся компании PTC и TeamViewer.

### Литература

1. 2.1 Million Manufacturing Jobs Could Go Unfilled by 2030 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.themanufacturinginstitute.org/2-1-million-manufacturing-jobs-could-go-unfilled-by-2030-11330/?stream=wafco-seeks-a-child-care-solution-to-the-labor-shortage> (дата обращения: 15.02.2022).

2. Краюшкин В. А., Лешихина И. Е., Пирогова М. А. Обзор передовых платформ дополненной реальности для разработки промышленных приложений уровня "рабочее место" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. № 4. С. 7—12.

3. Краюшкин В. А., Лешихина И. Е., Пирогова М. А. Обзор применимости популярных платформ дополненной реальности для задач современного дискретного производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. № 1. С. 3—7.



---

## AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY AS AN EFFECTIVE TOOL FOR APPLYING STEP-BY-STEP GUIDES AND INSTRUCTIONS IN THE WORKPLACE

M. A. Pirogova, I. E. Leshikhina

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

V. A. Krayushkin

LLC "PTS", Moscow, Russia

*The article discusses the possibility of effective industrial application of augmented reality technology for applying step-by-step guides and instructions in the workplace.*

*Keywords:* augmented reality, step-by-step guides and instructions, AR-development platforms, head mounted device — smart glass.

---

**Пирогова Марина Аркадьевна**, доцент.

E-mail: PirogovaMA@mpei.ru

**Лешихина Ирина Евгеньевна**, доцент.

E-mail: liy56@mail.ru

**Краюшкин Владимир Анатольевич**, руководитель проектов.

E-mail: vkray@pts-russia.com

*Статья поступила в редакцию 17 февраля 2022 г.*

УДК 621.375

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_2\_29

EDN: CSHKVM

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СХЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

С. В. Федоров, канд. техн. наук

Филиал ФГБОУ ВО "Уфимский государственный авиационный технический университет",  
Республика Башкортостан, г. Кумертау, Россия

Описано наиболее перспективное направление развития усилителей, используемых в информационно-измерительных системах, таких, как датчиковые системы и различные аналого-цифровые интерфейсы. Таким направлением является новый класс мультимодифференциальных дифференциальных каскадов в их внутренней структуре. На базе схемы операционного усилителя КР140УД1А был разработан мультимодифференциальный усилитель путем введения дополнительного дифференциального каскада. Проведено имитационное моделирование полученного мультимодифференциального усилителя в среде Multisim. На основании полученных характеристик были вычислены основные параметры усилителя, такие, как коэффициенты усиления дифференциального сигнала, коэффициенты ослабления синфазного сигнала для обоих каскадов. А также напряжение смещения нуля и напряжение сдвига. Используя полученные параметры, было выведено уравнение выходного сигнала мультимодифференциального операционного усилителя. Исходя из данного уравнения осуществлен структурный синтез схем инструментальных усилителей на основе мультимодифференциального операционного усилителя. Сравнение параметров спроектированного мультимодифференциального операционного усилителя с аналогичными для классических операционных усилителей, а также для современных инструментальных усилителей показало, что его параметры превосходят их по качественным показателям. В результате проведенных исследований был сделан вывод, что мультимодифференциальные операционные усилители перспективнее, чем традиционные инструментальные усилители.

**Ключевые слова:** мультимодифференциальный операционный усилитель, инструментальный усилитель, коэффициент ослабления синфазного напряжения, коэффициент усиления дифференциального сигнала, напряжение смещения нуля.

Одним из наиболее перспективных направлений развития усилителей, используемых в информационно-измерительных системах, таких, как датчиковые системы и различные аналого-цифровые интерфейсы являются мультимодифференциальные усилители (МОУ). Отличительной особенностью таких усилителей от классических операционных является наличие дополнительных дифференциальных каскадов в их внутренней структуре. Благодаря этому они обладают следующими преимуществами перед классическими операционными и инструментальными усилителями [1]:

- низкое напряжение смещения нуля;
- высокое значение коэффициента ослабления синфазного входного напряжения;
- отсутствие сложной структуры как в инструментальных усилителях (нет необходимости использовать от трех и более операционных усилителей).

В данной работе рассматривается проектирование и анализ мультимодифференциального операционного усилителя и структурный синтез схем инструментальных усилителей (ИУ) на его основе.

### Моделирование схемы замещения операционного усилителя КР140УД1А

В качестве исходной схемы выбран операционный усилитель КР140УД1А. Схема замеще-

ния данного операционного усилителя приведена (ОУ) на рис. 1 [2].

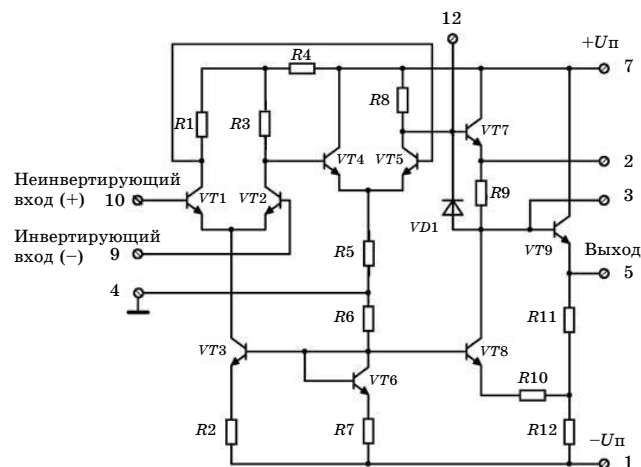


Рис. 1. Схема замещения ОУ КР140УД1А

Далее осуществлено имитационное моделирование схемы ОУ КР140УД1А в Multisim для дальнейшего проектирования МОУ на его основе. Более подробно данная процедура описана в работе [3].

Результат сравнения справочных данных ОУ КР140УД1А и параметров, полученных в результате имитационного моделирования в Multisim, представлен в табл. 1 [2, 3].

Таблица 1

Сравнение справочных и экспериментальных параметров ОУ КР140УД1А

Параметры операционного усилителя	Справочные данные	Экспериментальные данные
Напряжение питания К140УД1А, КР140УД1А	$\pm 6,3 \text{ В} \pm 0,5 \%$	$\pm 6,3 \text{ В}$
Макс. выходное напряжение при $U_{\text{п}} = \pm 6,3 \text{ В}$ , $R_{\text{н}} = 5,05 \text{ кОм}$ , $U_{\text{вх}} = \pm 0,1 \text{ В}$ К140УД1А, КР140УД1А	$\geq \pm 2,8 \text{ В}$ $\geq \pm 3 \text{ В}$	$\pm 3,62 \text{ В}$
Напряжение смещения нуля при $U_{\text{п}} = \pm 6,3 \text{ В}$ , $R_{\text{н}} = 5,05 \text{ кОм}$ К140УД1А, КР140УД1А	$\leq \pm 7 \text{ мВ}$	$\approx 0,4 \text{ мВ}$
Коэффициент усиления напряжения при $U_{\text{п}} = \pm 6,3 \text{ В}$ , $R_{\text{н}} = 5,05 \text{ кОм}$ К140УД1А, КР140УД1А	500—4500	1150
Коэффициент ослабления синфазного входного напряжения	$\geq 60 \text{ дБ}$	60,42 дБ

Сравнение справочных и экспериментальных параметров операционного усилителя КР140УД1А позволяет сделать заключение о соответствии имитационной и справочной модели ОУ.

Для решения проблем, связанных с высоким значением напряжения смещения нуля и низким коэффициентом ослабления синфазного входного напряжения, с помощью эффективных схемотехнических решений, основанных на введении дополнительных функциональных обратных связей, создан относительно новый класс активных элементов — мультидифференциаль-

ные ОУ (МОУ), которые и могут явиться основой схемотехники таких ИУ [4—9].

#### Проектирование и исследование мультидифференциального операционного усилителя на основе схемы ОУ КР140УД1А

На базе схемы ОУ КР140УД1А был разработан мультидифференциальный усилитель путем введения дополнительного дифференциального каскада (рис. 2). В схеме МОУ, как и в схеме ОУ КР140УД1А был выбран биполярный транзистор 2N1711. Имитационного моделирования МОУ проводилось также в Multisim.

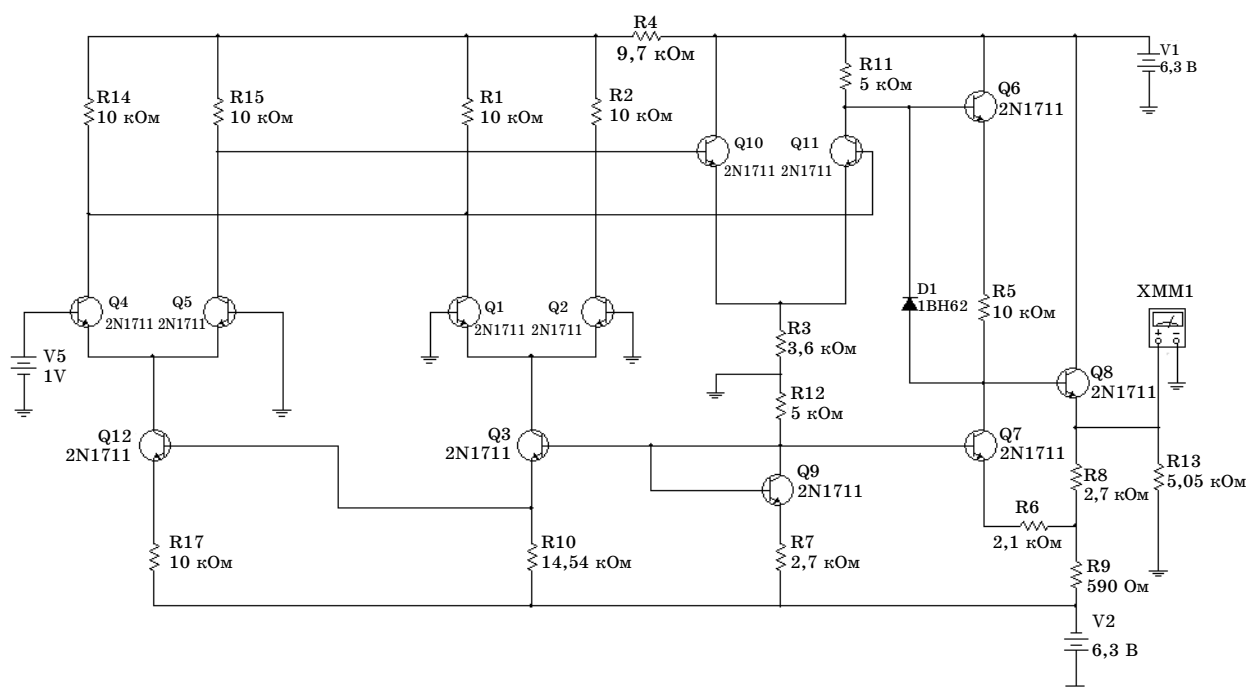


Рис. 2. Схема мультидифференциального усилителя на базе ОУ КР140УД1А

Исследование дифференциального режима работы мультидифференциального усилителя для одного дифференциального каскада с транзисторами Q4 и Q5 (сигнал подается на неинвертирующий вход транзистора Q4, транзисторы второго каскада Q1 и Q2 заземлены) привело к получению передаточной характеристики для дифференциального сигнала по постоянному току (рис. 3, а). На рис. 3, а показана передаточная характеристика для дифференциального сигнала для транзистора Q4. Где  $U_{вх}$  — входное дифференциальное напряжение,  $U_{вых}$  — выходное напряжение. Прерывистыми линиями показаны касательные к графикам для определения коэффициента усиления. На рис. 3, б показана передаточная характеристика для дифференциального сигнала для транзистора Q5 (инвертирующий вход).

Исследование дифференциального режима для второго дифференциального каскада с транзисторами Q1 и Q2 (сигнал подается на неинвертирующий вход транзистора Q1, транзисторы первого каскада Q4 и Q5 заземлены)

позволило получить передаточную характеристику второго каскада (рис. 4, а).

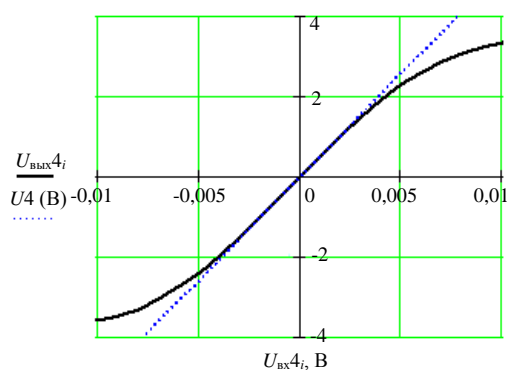
На рис. 4, б показана передаточная характеристика для дифференциального сигнала, который подается на инвертирующий вход транзистора Q2. Прерывистыми линиями показаны касательные к графикам для определения коэффициента усиления.

Анализируя графики передаточных характеристик для первого каскада (транзисторы Q4 и Q5), получаем значение коэффициента усиления дифференциального сигнала ( $K_{д1}$ ):

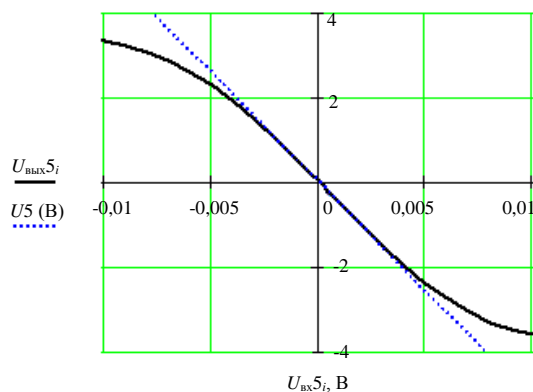
$$K_{д1} = \frac{U_{вых}}{U_{д1}} = 515,42.$$

Аналогично, анализируя передаточные характеристики второго каскада (транзисторы Q1 и Q2), получаем значение коэффициента усиления дифференциального сигнала ( $K_{д2}$ ):

$$K_{д2} = \frac{U_{вых}}{U_{д2}} = 542,77.$$

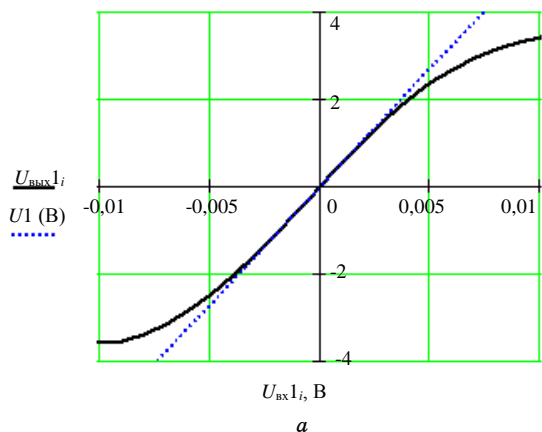


а

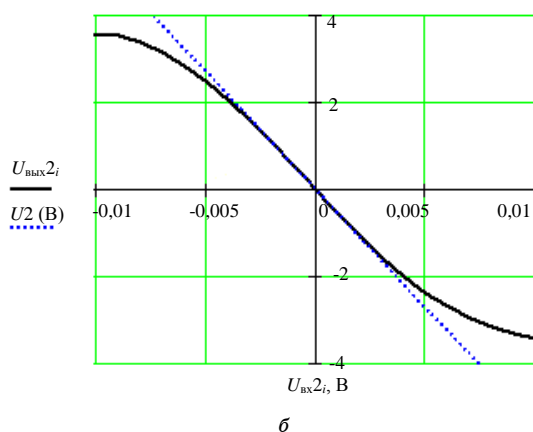


б

Рис. 3. Передаточные характеристики для дифференциального сигнала по постоянному току: а — для неинвертирующего входа транзистора Q4; б — инвертирующего входа транзистора Q5



а



б

Рис. 4. Передаточные характеристики для дифференциального сигнала по постоянному току: а — для неинвертирующего входа транзистора Q1; б — инвертирующего входа транзистора Q2

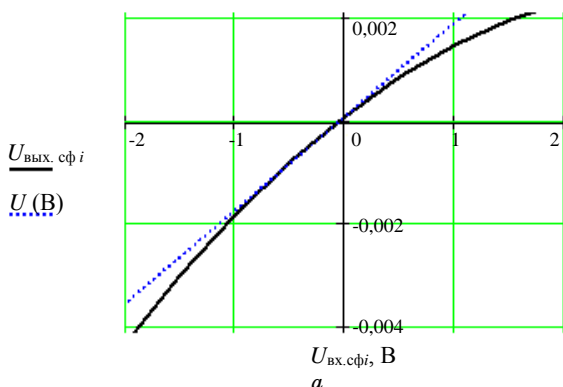
Напряжение сдвига  $U_{сд}$  исследуемого МОУ принимает следующее значение:

$$U_{сд} = 0,000088 \text{ В.}$$

Для исследования синфазного режима работы мультидифференциального усилителя для первого дифференциального каскада транзисторы Q4 и Q5 подключены к одному напряжению (второй каскад заземлен). Результатом является получение передаточной характеристики для синфазного сигнала по постоянному току (рис. 5, а). Аналогично для второго каскада с транзисторами Q1 и Q2 (транзисторы первого каскада Q4 и Q5 заземлены) получаем передаточную характеристику для синфазного сигнала по постоянному току (рис. 5, б), где  $U_{вх.сф}$  — входное синфазное напряжение,  $U_{вых.сф}$  — выходное синфазное напряжение. Прерывистыми линиями показаны касательные к графикам для определения коэффициентов усиления.

Из графиков получаем значение коэффициента усиления синфазного ( $K_{сф1}$ ) сигнала для первого каскада с транзисторами Q4 и Q5

$$K_{сф1} = \frac{U_{вых}}{U_{сф1}} = 0,001526.$$



Для второго каскада с транзисторами Q1 и Q2

$$K_{сф2} = \frac{U_{вых}}{U_{сф2}} = 0,004456.$$

В результате коэффициент ослабления синфазного сигнала ( $K_{осс}$ ) для первого каскада с транзисторами Q4 и Q5 принимает следующее значение:

$$K_{осс1} = 20 \log \left( \frac{K_{д1}}{K_{сф1}} \right) = 110,57 \text{ дБ.}$$

Для второго каскада с транзисторами Q1 и Q2:

$$K_{осс2} = 20 \log \left( \frac{K_{д2}}{K_{сф2}} \right) = 101,71 \text{ дБ.}$$

В табл. 2 показано сравнение параметров справочных и экспериментальных данных ОУ КР140УД1А с экспериментальными данными для МОУ. Также приведены данные инструментального усилителя производства компании Texas Instruments-INA333.

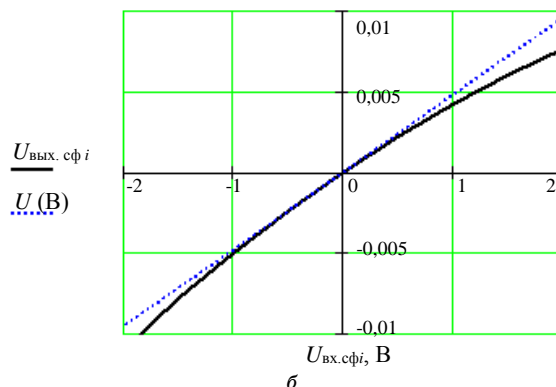


Рис. 5. Передаточные характеристики для синфазного режима работы первого дифференциального каскада с транзисторами Q4 и Q5 (а) и для синфазного режима работы второго дифференциального каскада с транзисторами Q1 и Q2 (б)

Сравнение параметров ОУ КР140УД1А с параметрами мультидифференциального усилителя

Таблица 2

Параметры операционного усилителя	Справочные данные ОУ КР140УД1А	Экспериментальные данные для ОУ КР140УД1А	Экспериментальные данные для МОУ	Инструментальный усилитель INA333
Напряжение питания	$\pm 6,3 \text{ В} \pm 0,5 \%$	$\pm 6,3 \text{ В}$	$\pm 6,3 \text{ В}$	Минимальное — 1,8 В. Максимальное — 5,5 В
Напряжение смещения нуля	При $U_{п} = \pm 6,3 \text{ В}$ , $R_{н} = 5,05 \text{ кОм}$ $\leq \pm 7 \text{ мВ}$	$\approx \pm 0,4 \text{ мВ}$	$\approx \pm 0,17 \text{ мкВ}$	25 мкВ
Коэффициент усиления напряжения	при $U_{п} = \pm 6,3 \text{ В}$ , $R_{н} = 5,05 \text{ кОм}$ 500—4500	1150	Для первого дифференциального каскада — 515,42. Для второго дифференциального каскада — 542,77	1000
Коэффициент ослабления синфазного входного напряжения	$\geq 60 \text{ дБ}$	60,42 дБ	Для первого дифференциального каскада, $\geq 110,57 \text{ дБ}$ . Для второго дифференциального каскада, $\geq 101,71 \text{ дБ}$	100 дБ



### Структурный синтез схем инструментальных усилителей на основе мультидифференциальных ОУ

Таким образом, имея значения коэффициентов усиления для инвертирующих и неинвертирующих входов дифференциальных каскадов можно перейти от общей условной схемы МОУ к схеме сигнального графа МОУ (рис. 6) [10, 11].

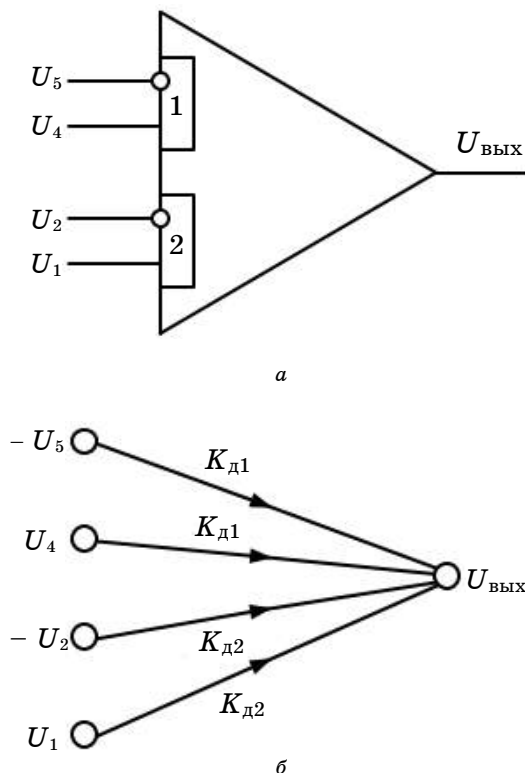


Рис. 6. Условное обозначение (а)  
и сигнальный граф (б) МОУ

Используя дифференциальные свойства каналов МОУ и коэффициенты ослабления синфазного сигнала каждого активного элемента, определим уравнение выходного сигнала МОУ из следующего выражения

$$U_{\text{вых}} = K_{д1}(U_4 - U_5) + K_{д2}(U_1 - U_2) + K_{сф1}U_{сф45} + K_{сф2}U_{сф12} + U_{сд}, \quad (1)$$

где  $U_4$  — напряжение на входе транзистора Q4 первого дифференциального каскада (рис. 2);

$U_5$  — напряжение на входе транзистора Q5 первого дифференциального каскада;

$U_1$  — напряжение на входе транзистора Q1 второго дифференциального каскада;

$U_2$  — напряжение на входе транзистора Q2 второго дифференциального каскада;

$U_{сф45}$  — синфазное напряжение на входе транзисторов Q4 и Q5 первого дифференциального каскада;

$U_{сф12}$  — синфазное напряжение на входе транзисторов Q1 и Q2 второго дифференциального каскада;

$U_{сд}$  — напряжение сдвига.

На основе схемы, приведенной на рис. 6, а, и уравнения (1) осуществим структурный синтез схем включения для разработанного МОУ. Для этого перепишем уравнение (1) в виде

$$U_{\text{вых}} = K_{д1}(U_4 - U_5) + K_{д2}(U_1 - U_2) + \Delta, \quad (2)$$

$$\Delta = K_{сф1}U_{сф45} + K_{сф2}U_{сф12} + U_{сд}.$$

В связи с особенностями архитектуры МОУ имеет ряд уникальных свойств. Основным является то, что возможно множество схем включения без резисторов обратной связи [12].

Первой синтезированной схемой включения МОУ является инвертирующий сумматор четырех потенциальных сигналов (рис. 7).

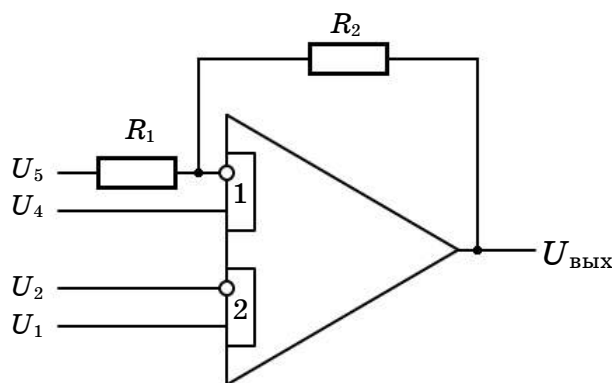


Рис. 7. Инвертирующий сумматор четырех  
потенциальных сигналов на основе МОУ

На основании второго закона Кирхгофа и уравнения (2) получаем уравнение выходного напряжения инвертирующего сумматора:

$$U_{\text{вых}} = \frac{K_{д1}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + K_{д1}R_1}U_4 - \frac{K_{д1}R_2}{R_1 + R_2 + K_{д1}R_1}U_5 + \frac{K_{д2}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + K_{д1}R_1}U_1 - \frac{K_{д2}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + K_{д1}R_1}U_2 + \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + K_{д1}R_1}\Delta.$$

Второй синтезированной схемой включения МОУ является неинвертирующий сумматор четырех потенциальных сигналов (рис. 8).

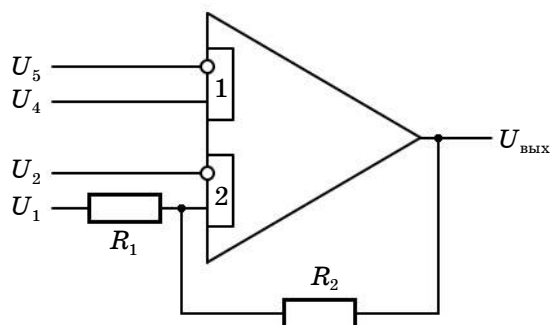


Рис. 8. Неинвертирующий сумматор четырех потенциальных сигналов на основе МОУ

На основании второго закона Кирхгофа и уравнения (2) получаем уравнение выходного напряжения неинвертирующего сумматора:

$$U_{\text{вых}} = \frac{K_{д1}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 - K_{д2}R_1} U_4 - \frac{K_{д1}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 - K_{д2}R_1} U_5 + \\ + \frac{K_{д2}R_2}{R_1 + R_2 - K_{д2}R_1} U_1 - \frac{K_{д2}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 - K_{д2}R_1} U_2 + \\ + \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 - K_{д2}R_1} \Delta.$$

### Заключение

В результате проведенных исследований был спроектирован мультидифференциальный операционный усилитель на базе ОУ КР140УД1А. Параметры разработанного МОУ были получены путем имитационного моделирования в среде Multisim. Сравнение этих параметров с аналогичными для ОУ КР140УД1А показало их существенное улучшение.

Сравнение параметров инструментального усилителя INA333 с аналогичными для разработанного МОУ показывает, что параметры МОУ превосходят INA333 по качественным показателям. Это означает, что МОУ более перспективен, чем традиционные инструментальные усилители. Также МОУ позволяют избавиться от сложной структуры ИУ на базе трех или четырех ОУ.

В ходе исследования получено уравнение МОУ, позволяющее выполнять сравнительно простые аналитические расчеты аналоговых устройств с учетом основных параметров функциональных узлов МОУ. На основе данного уравнения осуществлен структурный синтез схем включения для разработанного МОУ. Данный подкласс активных элементов дуален (по свойствам входов) классическим дифференциальным усилителям напряжения и позволяет создавать аналоговые интерфейсы для задач автоматизации и приборостроения с новыми каче-

ствами — обеспечивать одновременное суммирование и вычитание как потенциальных, так и токовых дифференциальных сигналов датчиков.

### Литература

1. Пахомов И. В. Мультидифференциальные операционные усилители напряжений и токов с активной отрицательной обратной связью: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т им. М. И. Платова. — Ростов-на-Дону, 2017. — 208 с.
2. Тарабрин Б. В., Лунин Л. Ф., Смирнов Ю. Н. и др. Интегральные микросхемы: Справочник / под ред. Тарабрина Б. В. — М.: Радио и связь, 1983. — 528 с.
3. Федоров С. В. Проектирование и исследование мультидифференциального операционного усилителя вторичных преобразователей датчиков для систем контроля и управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 11. С. 1—8. DOI 10.25791/pribor.11.2021.1300.
4. Крутчинский С. Г., Нефедова А. В., Старченко Е. И. Инструментальные усилители на базе мультидифференциальных ОУ // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2008. № 1. С. 360—365.
5. Крутчинский С. Г. и др. Прецизионные аналоговые интерфейсы на базе двух мультидифференциальных операционных усилителей // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3(26). — 72 с.
6. Крутчинский С. Г., Титов А. Е. Мультидифференциальный операционный усилитель в режиме инструментального усилителя // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. № 3 (101). С. 200—203.
7. Манжула В. Г., Прокопенко Н. Н. Прецизионный операционный усилитель с интегрированным мультидифференциальным входным каскадом // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. — 189 с.
8. Zainul Abidin, Koichi Tanno, Shota Mago, Hiroki Tamura. A New Instrumentation Amplifier Architecture Based on Differential Difference Amplifier for Biological Signal Processing // International J. Electrical and Computer Engineering (IJECE). April 2017. V. 7. № 2. P. 759—766.
9. Югай В. Я. и др. Метод повышения синфазной помехоустойчивости мультидифференциальных и инструментальных усилителей датчиковых систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 5 (178). С. 150—161.
10. Крутчинский С. Г., Титов А. Е. Оптимизация структур инструментальных усилителей с мультидифференциальными операционными усилителями // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2014. № 3. С. 9—14.
11. Крутчинский С. Г., Титов А. Е. Структурный синтез инструментальных усилителей на базе мультидифференциальных операционных усилителей (МОУ) // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 5(94). С. 72—81.
12. Прокопенко Н. Н., Бутырлагин Н. В., Пахомов И. В. Основные параметры и уравнения базовых схем включения мультидифференциальных операционных усилителей с высокоимпедансным узлом // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2014. № 3. С. 111—116.

## STRUCTURAL SYNTHESIS OF INSTRUMENTAL AMPLIFIER CIRCUITS BASED ON MULTIDIFFERENTIAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

S. V. Fedorov

The branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
"Ufa State Aviation Technical University",  
Republic of Bashkortostan, Kumertau, Russia

*This article describes the most promising direction of development of amplifiers used in information and measurement systems, such as sensor systems and various analog-to-digital interfaces. Such a direction today is a new class of multidifferential operational amplifiers, which differ from the classical ones by the presence of additional differential cascades in their internal structure. On the basis of the KR140UD1A operational amplifier circuit, a multidifferential amplifier was developed by introducing an additional differential cascade. Simulation modeling of the received multidifferential amplifier in the Multisim environment was carried out. Based on the obtained characteristics, the main parameters of the amplifier were calculated, such as the gain coefficients of the differential signal, the attenuation coefficients of the common-mode signal for both stages. As well as the zero offset voltage and the shear stress. Using the obtained parameters, the equation of the output signal of a multidifferential operational amplifier was derived. Based on this equation, a structural synthesis of instrumental amplifier circuits based on a multidifferential operational amplifier is carried out. A comparison of the parameters of the designed multidifferential operational amplifier with similar ones for classical operational amplifiers, as well as for modern instrumental amplifiers, showed that its parameters surpass them in quality indicators. As a result of the conducted research, it was concluded that multidifferential operational amplifiers are more promising than traditional instrumental amplifiers.*

**Keywords:** multidifferential operational amplifier, instrumental amplifier, common-mode voltage attenuation coefficient, differential signal amplification coefficient, zero offset voltage.

---

Федоров Сергей Витальевич, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов.  
E-mail: proinfosystem@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2022 г.

УДК 004.932

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_2\_36

EDN: CYUZDS

## ПЕРЕПРОГРАММИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ В СОСТАВЕ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

И. И. Огородников, канд. физ.-мат. наук; О. М. Огородникова, д-р техн. наук  
Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Россия

*Быстрое перепрограммирование промышленных роботов является требованием эффективной эксплуатации гибких производственных систем (ГПС). Представлена концепция быстрого перепрограммирования промышленных роботов автономным способом (off-line), которая основана на интеграции геометрической модели CAD-манипулятора в специализированную программную среду для визуализации и формирования траектории движения робота с дальнейшей загрузкой программы в контроллер робота. Программирование промышленных роботов способом off-line показано на примере симуляции линии по производству пряников в программной среде ABB RobotStudio.*

**Ключевые слова:** промышленный робот, манипулятор, программирование, ABB RobotStudio, гибкие производственные системы, ГПС.

В соответствии с определением национального стандарта РФ [1] промышленный робот является автоматически управляемым, перепрограммируемым манипулятором, который используется в целях автоматизации производства и программируется по трем или более степеням подвижности. Промышленные манипуляционные роботы предназначены для выполнения технологических операций и совершают управляемые пространственные перемещения. Роботы используются на автоматизированных линиях [2] и в составе гибких производственных систем (ГПС) [3]. Отличительной особенностью ГПС является возможность быстрой переналадки технологического оборудования, если возникает необходимость изменить объем производства или типоразмер выпускаемых изделий. Соответственно, роботы в составе ГПС должны обладать функцией быстрого и безошибочного перепрограммирования.

### Управление промышленными манипуляционными роботами

При проектировании и эксплуатации промышленных роботов существенное внимание уделяется приводам и алгоритмам управления [4]. Упрощенная блок-схема управления промышленного манипуляционного робота показана на рис. 1.

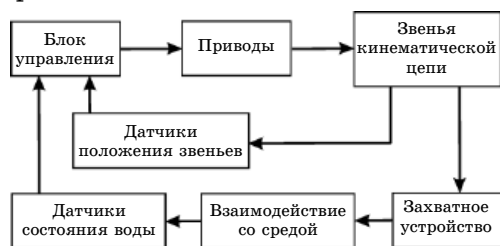


Рис. 1. Упрощенная блок-схема управления промышленным манипуляционным роботом

Управление роботом направлено прежде всего на позиционирование инструмента (захватного устройства) при движении по заданной траектории и может быть цикловым, позиционным, траекторным или контурным. При цикловом управлении программа жестко задает последовательность движений по всем степеням подвижности механической системы, при позиционном управлении указывается только последовательность точек позиционирования инструмента, при этом траектории движения между заданными точками не контролируются. В случае траекторного и контурного управления программа полностью задает траекторию движения инструмента, но при контурном управлении дополнительно контролируются значения скорости и ускорения вдоль заданной траектории.

Промышленные манипуляционные роботы с программным управлением выполняют движения в соответствии с заданной или изменяющейся последовательностью команд. Роботы с адаптивным управлением отличаются наличием датчиков, которые предоставляют информацию о контролируемых параметрах и позволяют автоматически изменять последовательность команд программы по результатам обработки данных от датчиков.

Физически управление промышленным роботом осуществляется через компьютерную систему робота, которая представляет собой комплекс аппаратно-программных средств, включая персональные компьютеры и планшеты, микропроцессоры и контроллеры вместе с соответствующим программным обеспечением для управления движениями и действиями робота, а также для обработки информации от датчиков. Перечисленные элементы системы управления размещены в отдельном блоке управления и

конструктивно отделены от движущегося манипулятора. Управление роботом можно осуществлять также через пульт обучения, который интерфейсно связан с контроллером робота и позволяет задавать движения звеньев манипулятора, записывать фактические координаты в программу, просматривать программу, выполнять программу пошагово, запускать программу в автоматическом режиме.

Манипуляционные роботы поставляются с системами управления и контроллерами, которые зачастую совместимы только в пределах одного бренда и различаются у разных производителей. Так, компания ABB использует принцип модульного построения системы управления ГПС, в соответствии с которым к одному центральному контроллеру можно подключить через интерфейс Ethernet несколько контроллеров, управляющих отдельными манипуляторами, и таким образом осуществляется централизованное управление оборудованием ГПС.

#### **Программирование движений промышленных манипуляционных роботов**

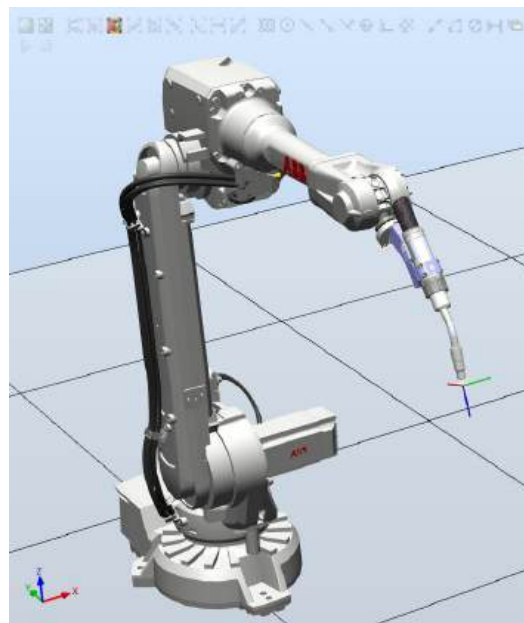
В программировании промышленных роботов различают управляющую программу и программу выполнения задания [5]. Управляющая программа создается производителем и определяет базовые действия и реакции робота, например, при столкновении с препятствием. Управляющую программу может изменять и модифицировать производитель. Программу выполнения задания создает пользователь и определяет движения робота, его действия при выполнении текущего задания. В программу выполнения задания может входить, например, поиск объектов по цвету, по размеру, по геометрии или по другому назначенному признаку [6]. Быстрое перепрограммирование промышленного робота в процессе эксплуатации подразумевает изменение программистом или оператором программы выполнения задания.

В практике быстрого перепрограммирования промышленных роботов используют два способа задать траекторию движения звеньев манипулятора:

- прямое указание точек позиционирования путем перемещения установленного на роботе инструмента с записью пространственных координат в программу через пульт обучения (способ on-line, программирование обучением);
- опосредованное формирование траектории движения через интерфейс автономной программы, в которой представлена достаточно подробная геометрическая модель CAD-робота и окружающего оборудования, соответственно, точки позиционирования задаются на виртуальной модели (способ off-line, автономное программирование).

При программировании способом on-line используют реальный робот, установленный на производстве, поэтому производство на время

перепрограммирования робота останавливается. При программировании способом off-line используют модель CAD-робота (рис. 2), поэтому производство на время перепрограммирования робота не останавливается, и специалист может создавать программу в удаленном режиме [7], выполняя одновременно программирование робота, симуляцию его движений и проверку программы.



*Рис. 2. Модель CAD-робота и инструмента, импортированная в рабочее окно программы ABB RobotStudio*

Что касается программирования в режиме off-line, универсальность промышленных манипуляционных роботов в части математического описания кинематики и динамики движения звеньев механической системы позволяет формулировать общие подходы к синтезу траектории, пространственному позиционированию звеньев и управлению обобщенными координатами. Таким образом, существуют предпосылки для развития универсальных симуляторов, моделирующих траектории движения промышленных роботов с различными техническими характеристиками от разных производителей.

Основная проблема на пути создания универсальных симуляторов промышленных роботов заключается в контроллерах от разных производителей, которые имеют различия в представлении движений в управляющей программе и программе выполнения задания. Более того, каждый крупный производитель старается развивать свой собственный язык программирования роботов для реализации программ выполнения задания с учетом особенностей своих контроллеров. Соответственно, каждый крупный производитель создает библиотеку моделей своих промышленных роботов для задач симуляции и снабжает ее транслятором, генерирующим собственный код для загрузки в контроллер робота. Так, программирование роботов



ABB выполняется на языке RAPID. Программа на языке RAPID имеет модульную структуру по аналогии с языком C и содержит следующие элементы: program data (данные о координатных системах, координатах, значениях скорости и другие параметры), main routine (главный модуль, из которого вызываются подпрограммы), sub-routines (подпрограммы).

По аналогии со станками с числовым программным управлением (ЧПУ) и программным обеспечением CAM (Computer-aided-manufacturing) программу управления движениями робота можно создать в G-кодах, указав координаты центральной точки инструмента в декартовом пространстве, при этом фактическое положение осей робота будет пересчитано контроллером. Но следует отметить, что промышленные манипуляционные роботы отличаются от станков с ЧПУ меньшей жесткостью и точностью.

Авторами были протестированы симуляторы для программирования способом off-line от производителей роботов ABB RobotStudio, FANUC RoboGuide, Kuka.SIM, Yaskawa Motoman MotoSim EG. На текущий момент симулятор ABB RobotStudio не только является лучшим в классе по уровню сервисов, но и обладает наибольшим потенциалом к наращиванию мощности. Компания ABB заключила соглашение о стратегическом партнерстве с лидерским разработчиком программного обеспечения CAD/CAE/CAM/PLM — компанией Dassault Systemes [8], чья программа CAD Solidworks безусловно является лучшей в классе. От этого союза ожидают уникальных решений в области проектирования робототехнических систем европейского базирования.

Для автономного программирования промышленных роботов от разных производителей используют также симуляторы SprutCam Robot (программа от российского разработчика, г. Набережные Челны), Delfoi, Robotmaster, OSTOPUZ, RoboDK, Delmia, Energid Actin, Artiminds, Gazebo, Autodesk PowerMill, Siemens Process Simulate.

Если уточнять термины в связи с применением программного обеспечения ABB RobotStudio в переналадке гибкой производственной системы, программирование роботов в режиме on-line и off-line понимается следующим образом. При работе в режиме off-line программа выполнения задания реализуется на виртуальном контроллере без связи с реальным роботом. Под виртуальным контроллером понимается программа, которая эмулирует работу контроллера и позволяет в симуляторе запускать и проверять программу выполнения задания с просмотром соответствующих движений модели робота. При работе в режиме on-line программа выполнения задания загружается в контроллер робота и реализуется на реальном контроллере. Для этого достаточно, чтобы компьютер с установленным симулятором RobotStudio был подключен в компьютерную систему робота.

### Планирование групповой работы манипуляционных роботов

Несколько роботов могут одновременно работать на автоматизированной линии, выполняя согласованные действия. Планирование и программирование групповой работы манипуляционных роботов удобно выполнять с использованием программы-симулятора. Следует отметить, что большое разнообразие конструкторских решений в создании автоматизированных линий с применением роботов наблюдается в пищевой промышленности, и компания ABB активно внедряет роботов именно в этом секторе российской экономики [9]. Применение роботов в пищевой промышленности позволяет организовать стерильные производственные зоны, что способствует повышению качества продуктов.

В качестве примера авторами спроектирована в программной среде ABB RobotStudio автоматизированная линия по выпечке и упаковке пряников (рис. 3).

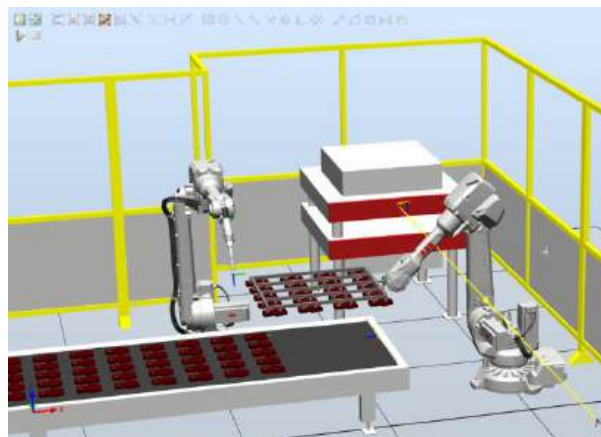


Рис. 3. Гибкая производственная линия в пищевой промышленности, участок художественного украшения пряников

Линия обладает признаками ГПС, поскольку многие параметры готовой продукции могут меняться, например, объем выпуска, форма и размер пряников, их начинка и внешнее оформление, упаковка и количество пряников в коробке. На линии использованы роботы ABB моделей IRB 2600 и IRB 360 FlexPicker. Роботы занимаются художественным оформлением пряников и упаковкой готовой продукции.

Процесс планирования ГПС и программирования роботов способом off-line включает несколько этапов.

#### 1) Создание модели CAD

При планировании производства геометрические модели CAD необходимых роботов добавлены в рабочее пространство из библиотеки программы ABB RobotStudio. Из библиотеки также добавлены многие компоненты автоматизированной линии, включая конвейеры, боксы, поддоны. Некоторые инструменты роботов, в том числе, захватные устройства, и геометриче-

ские модели пряников, а также упаковки были построены в CAD КОМПАС и импортированы в формате ACIS (\*.SAT).

### 2) Формирование траектории

После того, как сформировано рабочее пространство робота, импортированы и расположены в виртуальном мире все предметы, с которыми робот соприкасается и работает, начинается планирование перемещений и действий, выполняемых роботом. На этом этапе в проект добавляют виртуальный контроллер и выбирают его опции.

### 3) Формирование программы

Программы выполнения задания написаны на скриптовом языке программирования RAPID. Пример программы для робота, выполняющего художественное оформление пряников, показан на листинге.

*Программа на языке RAPID, задающая движения робота ABB на участке художественного украшения пряников*

```
MODULE Module1
  CONST robtarget
  TargetPryanik:=[[720,280,450],[0.156434465,0,0.
  987688341,0],[0,0,-
  1,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget
  TargetHome:=[[1327.303002645,0,1121.58779493
  5],[0.156434466,0,0.98768834,0],[0,0,0,0],[9E+0
  9,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST num safety_height := 100;
  CONST num pryanik_length := 160;
  CONST num pryanik_width := 240;
  CONST num pryanik_Nx := 4;
  CONST num pryanik_Ny := 5;
  PERS num topping_is_ready := 0;
  PROC main()
    topping_is_ready := 0;
    MoveJ Tar-
    getHome,v1000,z100,tWeldGun\WObj:=wobj0;
    WaitRob\InPos;
    SetDO enable_pryanik_conveyor0,1;
    WHILE TRUE DO
      WaitDI pryanik_is_ready0,1;
      AddTopping;
      topping_is_ready := 1;
      WaitDI pryanik_is_ready0,0;
      topping_is_ready := 0;
    ENDWHILE
  ENDPROC
  PROC AddTopping()
    VAR num ix := pryanik_Nx-1;
    VAR num iy := pryanik_Ny-1;
    MoveL
    Offs(TargetPryanik,0,0,safety_height),v1000,z10
    0,tWeldGun\WObj:=wobj0;
    MoveL TargetPryan-
    ik,v1000,z0,tWeldGun\WObj:=wobj0;
    MoveL Offs(TargetPryanik,(pryanik_Ny-
    1)*pryanik_length,0,0),v1000,z0,tWeldGun\WObj
    :=wobj0;
```

```
  WHILE iy >= 0 DO
    MoveL
    Offs(TargetPryanik,iy*pryanik_length,ix*pryanik
    _width,0),v1000,z0,tWeldGun\WObj:=wobj0;
    iy := iy-1;
    IF iy >= 0 THEN
      MoveL
      Offs(TargetPryanik,iy*pryanik_length,ix*pryanik
      _width,0),v1000,z0,tWeldGun\WObj:=wobj0;
      IF ix > 1 THEN
        ix := 1;
      ELSE
        ix := pryanik_Nx-1;
      ENDIF
    ELSE
      MoveL
      Offs(TargetPryanik,(iy+1)*pryanik_length,ix*pry
      an-
      ik_width,safety_height),v1000,z0,tWeldGun\WO
      bj:=wobj0;
      MoveJ Tar-
      getHome,v1000,z100,tWeldGun\WObj:=wobj0;
      WaitRob\InPos;
    ENDIF
  ENDWHILE
ENDPROC
ENDMODULE
```

### 4) Проверка программы и симуляция движений

Согласованной работой всех промышленных роботов управляет центральный контроллер IRC5. При программировании off-line работа ведется с виртуальным контроллером, но в итоге формируется программа, которую можно загружать непосредственно в контроллер робота. В программной среде RobotStudio созданная программа проходит проверку, выполняется симуляция движений, в ходе которой выявляются ошибки и возможные столкновения. По результатам верификации вносят необходимые изменения в программу.

## Заключение

Быстрое перепрограммирование промышленных манипуляционных роботов является важным требованием гибких производственных систем (ГПС). Автономный способ off-line быстрого перепрограммирования роботов является наилучшим выбором для ГПС, поскольку позволяет перенастроить оборудование без остановки производства. Автономное программирование выполняется с использованием программ, симулирующих движения роботов и выполнение операций на автоматизированной линии. В данной работе с использованием программы ABB RobotStudio собрана линия по изготовлению пряников, где несколько роботов выполняют технологические операции под управлением центрального контроллера.

**Литература**

1. ГОСТ Р 60.0.7.1-2016 Роботы и робототехнические устройства. Методы программирования и взаимодействия с оператором. — М.: Стандартинформ, 2016. — 16 с.
2. Roque Vidal L. F., Ogorodnikova O. M. Project of an automated line for the production of lithium-ion batteries in Bolivia // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2313. P. 040008.
3. Arents J., Greitans M. Smart industrial robot control trends, challenges and opportunities within manufacturing // Applied Sciences. 2022. V. 12. P. 937.
4. Огородникова О. М., Ваганов К. А., Юшков И. В. Адаптация стандартов ЕСКД последней редакции для проектирования промышленных роботов в интегрированной программной среде // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 2. С. 49—55.
5. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2019. — 31 с.
6. Ogorodnikova O. M., Ali W. Method of ripe tomato detecting for a harvesting robot // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2174. P. 020146.
7. Огородникова О. М., Власов В. Н. Проектирование мехатронных систем в облаках и управление проектом в среде Siemens Teamcenter // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. № 4. С. 78—86.
8. ABB and Dassault Systemes enter global software partnership for digital industries // Официальный сайт компании ABB [Электронный ресурс]. URL: <https://new.abb.com/news/detail/16803/abb-and-dassault-systemes-enter-global-software-partnership-for-digital-industries>. (дата обращения: 25.02.2022).
9. Корнилов И. Робот на пищевом производстве: возможности и перспективы // Control Engineering — Россия. 2020. № 4. С. 22—25.

## REPROGRAMMING OF INDUSTRIAL ROBOTS AS PART OF A FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEM

I. I. Ogorodnikov, O. M. Ogorodnikova

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia

*Rapid reprogramming of industrial robots is essential for the efficient operation of flexible manufacturing systems (FMS). In this paper, the actual concept of programming industrial robots offline is presented. The modern approach involves the use of a geometric CAD model of the manipulator in a separate program to simulate the movements of the robot and create a trajectory, followed by loading the program into the robot controller. Offline programming of industrial robots is shown on the example of a honey-cake production line assembled in the ABB RobotStudio.*

**Keywords:** industrial robot, manipulator, programming, adaptive control, flexible manufacturing systems, FMS.

Огородников Илья Игоревич, доцент.

E-mail: I.I.Ogorodnikov@UrFU.ru

Огородникова Ольга Михайловна, профессор.

E-mail: Olga.Ogorodnikova@UrFU.ru

Статья поступила в редакцию 5 марта 2022 г.

УДК 519.8.004.94

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_2\_41

EDN: DDDIHA

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СОХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ РАСЧЕТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В СИСТЕМЕ "УРАНИЯ"

С. В. Сумароков; А. А. Кечков; Т. А. Грошев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН),  
Москва, Россия

С. О. Кириенко

АО «Прорыв», Москва, Россия

*Представлено описание модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с интегральными расчетными математическими моделями энергоблока с реакторной установкой БР-1200 и ОДЭК.*

**Ключевые слова:** система "УРАНИЯ", интеграция, интегральная расчетная математическая модель, расчётные исследования, результаты расчетов.

В системе управления данными и процессами расчётных и экспериментальных научных исследований "УРАНИЯ", разрабатываемой в рамках реализующегося в атомной отрасли проектного направления "Прорыв" [1], предусмотрена интеграция с внешними расчетными системами и платформами. Одними из таких внешних систем являются интегральные расчетные математические модели, предназначенные для динамического моделирования работы ОИЯЭ, разрабатываемых в проектом направлении "Прорыв".

В соответствии с ТЗ на работу "Создание интегральной расчетной математической модели энергоблока с РУ БР-1200" интегральная расчетная математическая модель энергоблока с реакторной установкой БР-1200 (ИРММ ЭБ с РУ БР-1200) предназначена для динамического моделирования работы энергоблока с РУ БР-1200 в номинальном и ряде переходных и аварийных режимов. ИРММ ЭБ с РУ БР-1200

должна служить для расчетной апробации проектных решений, т. е. расчетов, позволяющих выявить возможные коллизии по технологическим параметрам, а также для поиска возможных путей устранения таких коллизий. Также технологические и технические решения, принятые при создании ИРММ ЭБ с РУ БР-1200, в будущем могут быть использованы для создания полномасштабного и/или аналитического тренажера для оперативного персонала энергоблока с РУ БР-1200.

На рис. 1 представлена структура ИРММ ЭБ с РУ БР-1200.

ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 строится на базе исполнительной системы реального времени (ИСПВ) и состоит из частных математических моделей. В ходе проведения расчетов системой визуализации и управления (СВиУ) строятся графики основных контролируемых параметров ИРММ, которые впоследствии могут быть представлены как набор текстовых файлов.

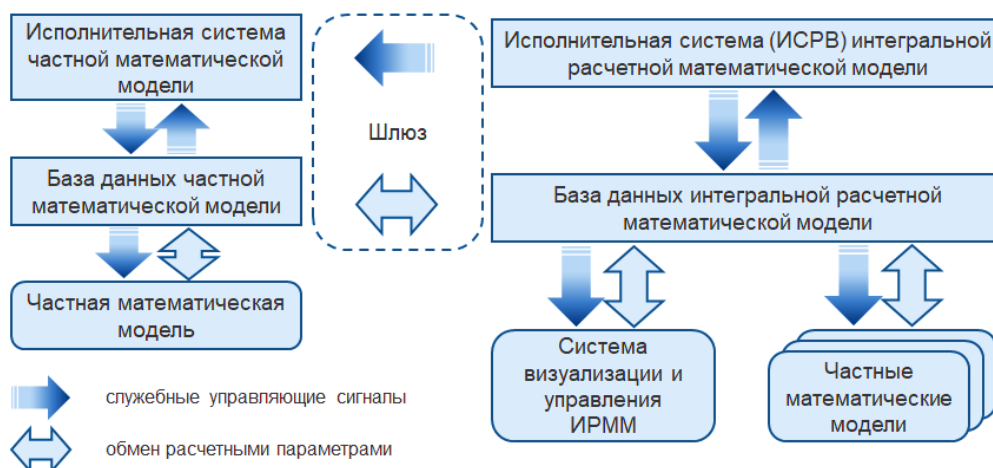


Рис. 1. Структура ИРММ ЭБ с РУ БР-1200

По тем же принципам разработана ИРММ энергоблока с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300, входящая в состав интегральной расчетной математической модели опытно-демонстрационного энергокомплекса (ИРММ ОДЭК). Архитектурно ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК отличаются набором частных математических моделей, входящих в их состав, варианты которых также могут меняться в зависимости от конкретных режимов выполняемых расчетов. Функционирование ИСРВ ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК выполняется под ОС Linux.

Исходные данные и результаты расчетов ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК сохраняются пользователями на портале единого информационного пространства ПН "Прорыв" (реализованном на базе Microsoft SharePoint) в ручном режиме. При этом графики поведения основных контролируемых параметров ИРММ в виде статичных изображений выгружаются непосредственно из интерфейса ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 вручную. Кроме недостатка в виде больших трудозатрат на подготовку и ручной ввод информации, такое решение не позволяет (в силу изначально другого назначения портала ПН "Прорыв" и функциональных возможностей платформы Microsoft SharePoint) однозначно сохранить и проследить все варианты расчетов, отследить связь версий частных математических моделей и результатов конкретного варианта расчета, а также выполнить какую-либо аналитику в автоматизированном режиме.

В то же время в АО "Прорыв" начинается внедрение системы "УРАНИЯ", которая, в первую очередь, предназначена для управления расчетными данными [2]. Система "УРАНИЯ" разрабатывается с 2019 г. на базе программной платформы CML-Bench [3]. Результаты разработки одного из модулей системы "УРАНИЯ" — модуля визуализации результатов расчетов в онлайн-режиме представлены в [4].

Для устранения указанных недостатков при работе с данными ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК необходимо обеспечить их передачу из ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК в систему "УРАНИЯ". Для этих целей был разработан модуль интеграции, автоматизирующий сохранение исходных данных и результатов расчетов ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК в структурированном виде в систему "УРАНИЯ".

#### Основные технические решения по реализации модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК

##### Алгоритм работы модуля интеграции

Модуль интеграции должен обеспечивать сохранение в системе "УРАНИЯ" всех расчетных данных, формирующихся по результатам расче-

тов в ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК, а также информации о версиях частных математических моделей, использовавшихся в составе ИРММ при проведении этих расчетов. В общем случае эти данные включают в себя:

- версии или сведения о версиях частных математических моделей в составе ИРММ при проведении расчета;
- входные файлы для расчетов;
- (опционально) сценарий проведения расчета;
- результаты расчета.

Указанные данные собираются во внутренних директориях ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК. В силу отсутствия возможности обращения к внутренним директориям ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК со стороны системы "УРАНИЯ" было принято решение о разработке механизмов автоматической выгрузки данных из этих директорий в сетевую папку, которая может быть доступна для системы "УРАНИЯ".

После выгрузки данных из ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК в сетевую папку эти данные должны забираться и загружаться в систему "УРАНИЯ" с помощью модуля интеграции.

На рис. 2 показана схема работы модуля интеграции для системы "УРАНИЯ" с ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК.

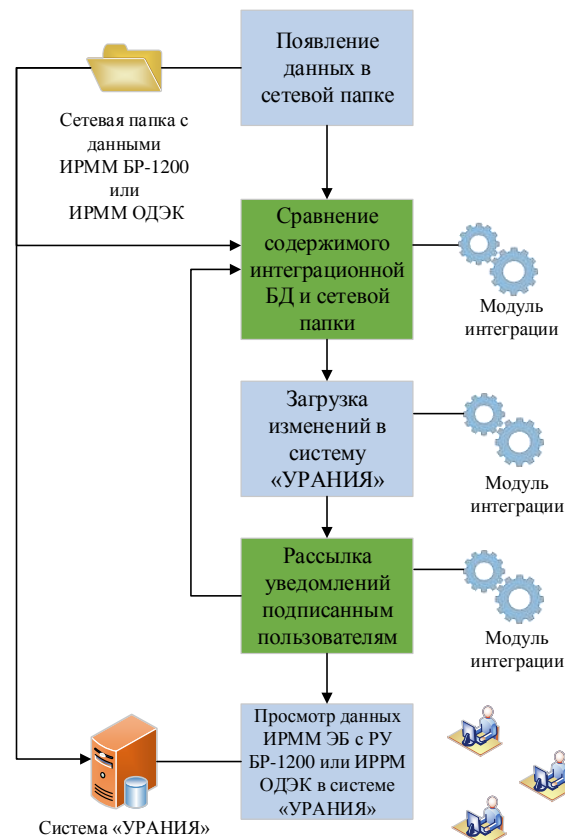


Рис. 2. Схема работы модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК



Согласно представленной схеме модуль интеграции должен выполнять в цикле следующие действия:

- обход сетевой папки и анализ данных, сохраненных в ней,
- сравнение записей в своей интеграционной базе данных с содержимым сетевой папки и, в случае обнаружения новых данных или изменений в сетевой папке внесение соответствующих записей в интеграционную базу данных,
- загрузку новых файлов и изменений в систему "УРАНИЯ" из сетевой папки,
- автоматическую рассылку пользователям системы "УРАНИЯ" уведомлений об изменениях в расчетных данных, загруженных в систему "УРАНИЯ" из ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 или ИРММ ОДЭК.

### Структура хранения данных в сетевой папке

На рис. 3 показана разработанная структура хранения данных ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК в сетевой папке, которая позволяет обработать и загрузить эти данные в автоматическом режиме в систему "УРАНИЯ".

На верхнем уровне сетевой папки должны располагаться две папки — "Модели" и "Расчеты" — для хранения модели и результатов расчетов соответственно. В данном случае под моделью понимается набор входных расчетных моделей (входных данных для расчета) и версий расчетных модулей, использующихся для конкретного варианта расчета. Для каждой модели должна создаваться отдельная папка на дочернем уровне папки "Модели". Версии моделей должны храниться в отдельных дочерних папках каждой модели, куда помещаются архивы, содержащие файлы данной версии модели и версии расчетных модулей.

В папке "Расчеты" для каждой группы расчетов должна создаваться следующая структура: "Группа расчетов <Number>" → "Расчет <Number>" → "var <Number>", где вместо <Number> указываются номера группы расчетов, расчета и расчетного случая. В папку "var <Number>" должны выгружаться файлы, содержащие данные, относящиеся к одному варианту расчета, и файл "model.toml", в котором в виде пары ключ-значение должно быть указано, к какой модели и какой версии относится данный расчетный случай. Пример заполненной структуры хранения данных в сетевой папке ИРММ показан на рис. 4.

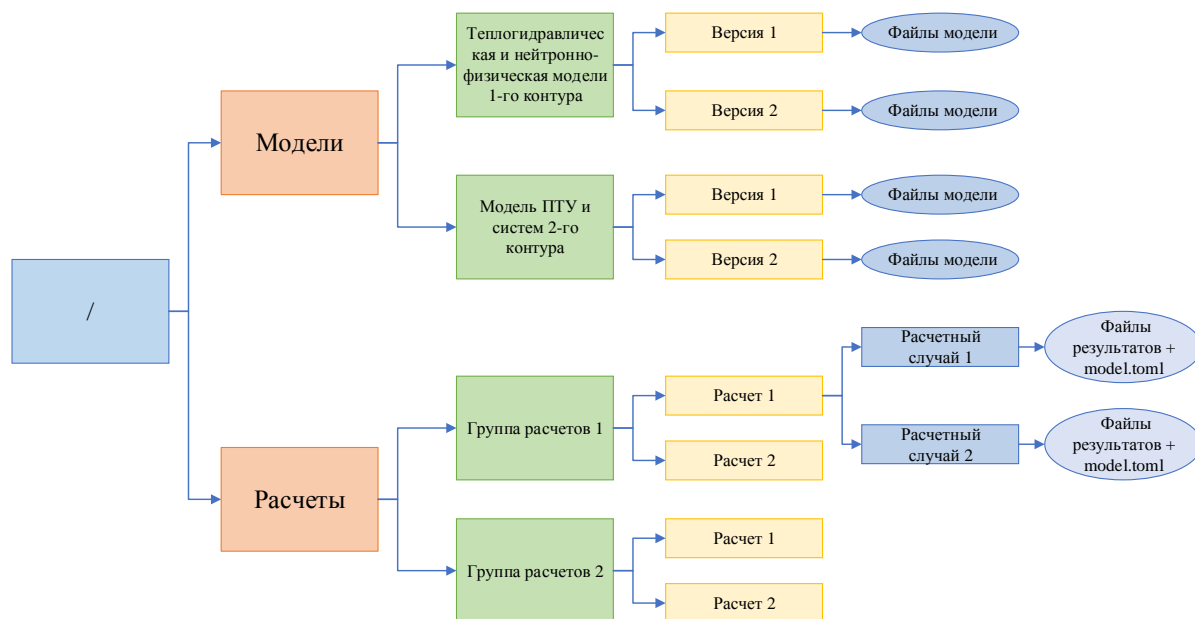


Рис. 3. Структура хранения данных в сетевой папке ИРММ

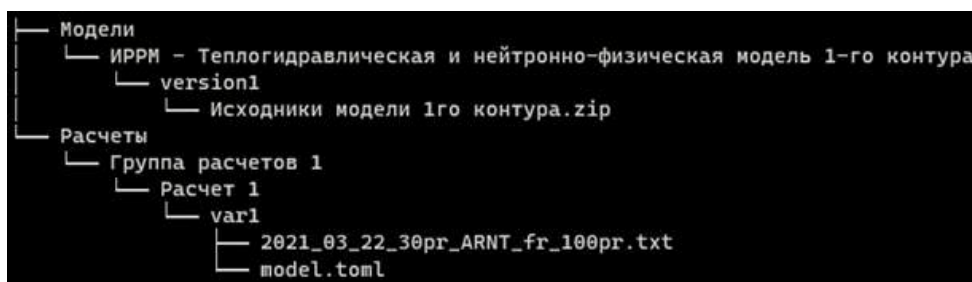


Рис. 4. Пример содержимого сетевой папки ИРММ



### Соответствие структуры сетевой папки и структуры хранения данных в системе "УРАНИЯ"

Модуль интеграции должен выполнять отображение сетевой папки ИРММ и автоматическое создание объектов системы "УРАНИЯ" определенных типов, т. е. каждому объекту сетевой папки должен однозначно сопоставляться объект системы "УРАНИЯ". Соответствие объектов сетевой папки ИРММ и типов объектов системы "УРАНИЯ" приведено в табл. 1.

#### Реализация модуля интеграции

Модуль интеграции реализован в соответствии с описанными техническими решениями. Для разработки модуля использован язык программирования Java версии 1.8.0\_144, универсальный фреймворк Spring Framework версии 2.5.1, библиотека Jackson версии 2.12.3 и Apache http components версии 4.5.13. В качестве СУБД для хранения интеграционной базы данных использована PostgreSQL версии 42.2.20.

Для проверки работы модуля интеграции была использована связанная теплогидравлическая и нейтронно-физическая модель 1-го контура РУ и результаты расчета на ИРММ. В соответствии со схемой хранения данных в сетевую папку были выгружены указанная модель и результаты расчетов ИРММ ОДЭК на данной модели. На рис. 4 показано дерево сетевой папки до работы модуля интеграции.

В результате обработки данных сетевой папки модулем интеграции в системе "УРАНИЯ" автоматически была создана структура объектов, показанная на рис. 5.

Была создана связь между объектами "Входной файл" и "Расчетный случай", показанная на рис. 6. За счет данной связи в системе "УРАНИЯ" можно определить с помощью каких версий расчетных моделей и версий расчетных модулей выполнялся конкретный вариант расчета. Соответственно, имеется возможность проследить на основании каких данных и модулей получены результаты расчета, а также, при необходимости, можно воспроизвести тот или иной вариант расчета.

Таблица 1

Соответствие основных объектов сетевой папки ИРММ и объектов системы "УРАНИЯ"

Объект сетевой папки	Объект системы "УРАНИЯ"	Назначение папки и объекта
Сетевая папка	Папка или проект ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 или ИРММ ОДЭК	Хранение данных ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 или ИРММ ОДЭК
Папка "Расчеты"	Папка "Расчеты"	Хранение расчетных данных
Папка "Группа расчетов <Number>"	Папка "Группа расчетов"	Группировка разных типов сценариев или типов расчетов
Папка "Расчет <Number>"	Объект "Расчет"	Группировка разных расчетов с соответствующими сценариями
Папка "var<Number>"	Объект "Расчетный случай"	Группировка данных, относящихся к варианту расчета с определенными входными параметрами
Папка "Модели"	Папка "Модели"	Группировка расчетных моделей
Папка "Версия конкретной модели"	Папка "Версия конкретной модели"	Группировка файлов, относящихся к версии конкретной модели

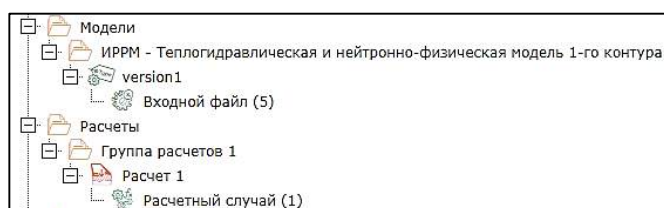


Рис. 5. Структура объектов в системе "УРАНИЯ"

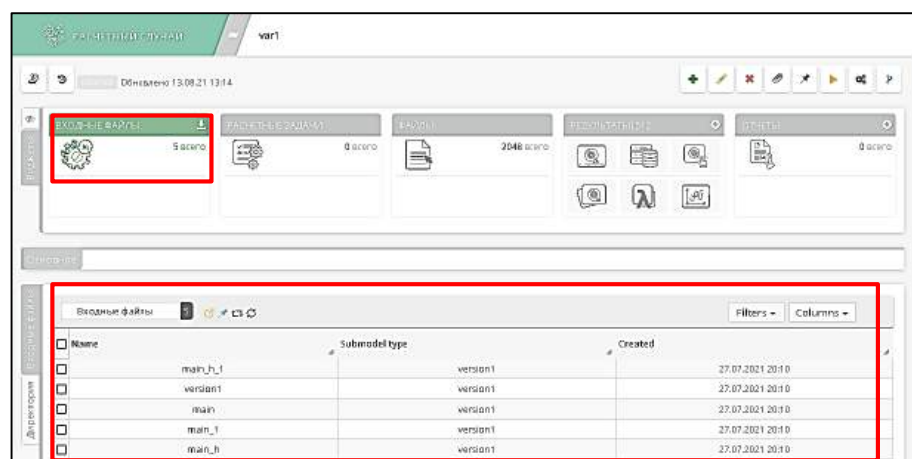


Рис. 6. Связь между моделью и расчетным случаем

Модулем интеграции была выполнена автоматическая обработка выходных данных ИРММ и загрузка обработанных данных в систему "УРАНИЯ" в объект "Расчетный случай" сразу в виде интерактивных графиков, показанных на рис. 7.

Объекты типа "График" являются интерактивными объектами системы "УРАНИЯ", с которыми можно взаимодействовать (изменять масштаб и выделять определенную область, смотреть значение параметра в конкретной точке, сохранить как картинку и т. д.). Пример

отображения выбранного интерактивного графика в системе "УРАНИЯ" показан на рис. 8. На приведенном графике изображена зависимость температуры на входе в 4-й канал САОР (системы аварийного охлаждения реактора) от времени. Температура откладывается в градусах Цельсия, а время в секундах. При этом инструментами системы "УРАНИЯ" можно выполнять автоматизированное сравнение интерактивных графиков для одних и тех же величин для разных расчетных случаев.

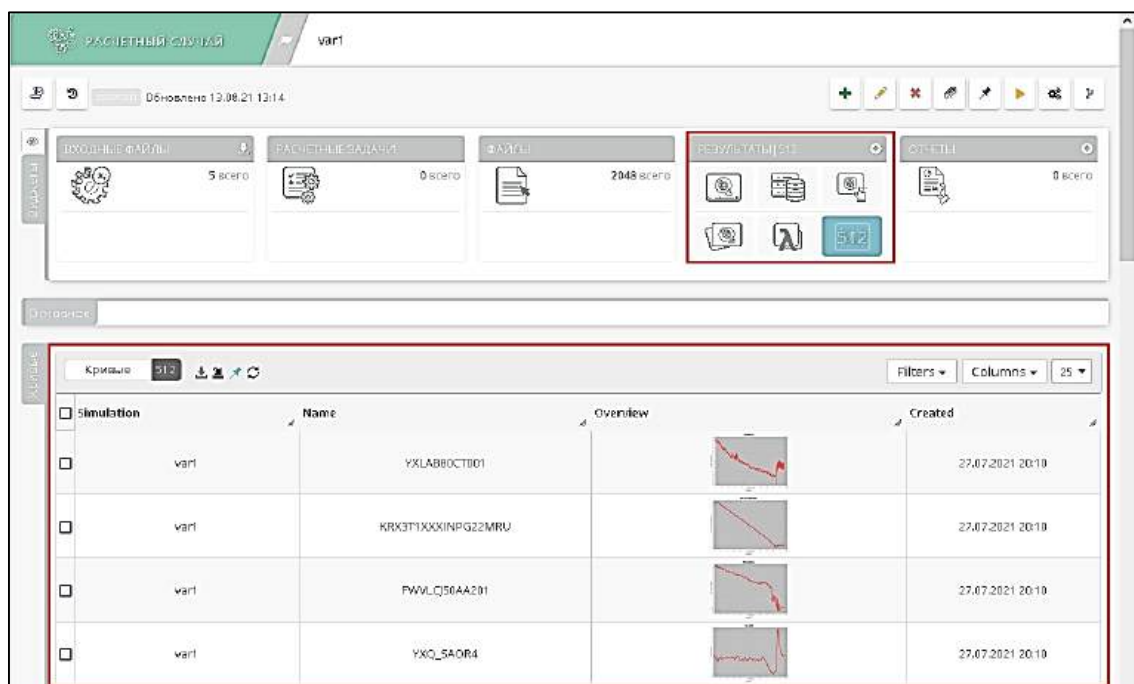


Рис. 7. Результаты расчета типа "График"

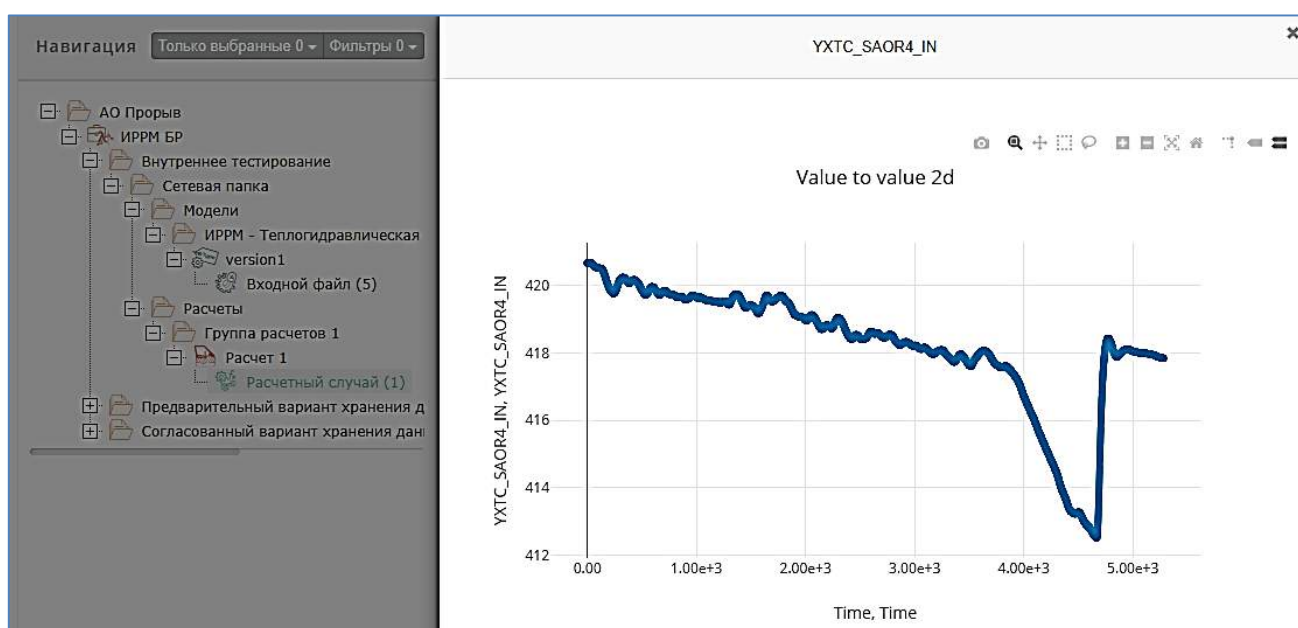


Рис. 8. Объект "График" в интерфейсе системы "УРАНИЯ"

### Заключение

Разработанный модуль интеграции обеспечивает следующие возможности:

- автоматизированную загрузку исходных данных и результатов расчетов ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 или ИРММ ОДЭК в систему "УРАНИЯ";
- автоматическую обработку, формирование и сохранение в системе "УРАНИЯ" интерактивных графиков вместо ручного построения и хранения статичных графических изображений;
- сохранение в системе "УРАНИЯ" связи между расчетными случаями и исходными данными (моделями) для возможности воспроизведения расчетов (в случае такой необходимости);
- удобную навигацию и просмотр расчетных данных ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 или ИРММ ОДЭК, сохраненных в системе "УРАНИЯ".

Использование модуля интеграции системы "УРАНИЯ" с ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК в целом позволит сократить время на сбор и анализ результатов расчетов ИРММ ЭБ с РУ БР-1200 и ИРММ ОДЭК, а также обеспечить их надежное хранение в системе "УРАНИЯ".

В дальнейшем также планируется развитие функций анализа результатов расчетов за счет обеспечения возможности наложения друг на друга графиков разных параметров.

### Литература

1. Большов Л. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф., Шмидт О. В. Расчётные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 6. С. 132—137.
2. Сумароков С. В., Гусев М. В., Кечков А. А., Новосельский Ф. О. Концепция и реализация макета системы управления данными и процессами расчётных и экспериментальных научных исследований // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 1. С. 3—7.
3. Описание цифровой платформы CML-Bench, URL: <http://fea.ru/article/cml-bench>.
4. Сумароков С. В., Гусев М. В., Кечков А. А., Новосельский Ф. О., Грошев Т. А., Комиссаров К. В., Белокрылов П. Ю., Повереннов Е. Ю. // Визуализация результатов вычислений в онлайн-режиме в системе "УРАНИЯ" // Информационные технологии в проектировании и производстве, 2021. № 2. С. 25—29.

## AUTOMATION OF SAVING AND PROCESSING THE COMPUTATIONAL RESULTS OF THE INTEGRAL COMPUTATIONAL MATHEMATICAL MODEL IN THE "URANIA" SYSTEM

S. V. Sumarokov, A. A. Kechkov, T. A. Groshev  
Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Safe Development  
of Nuclear Power Industry of the RAS, Moscow, Russia

S. O. Kirienko  
JSC "Proryv", Moscow, Russia

*This article provides description of the module for integration "URANIYA" system and integral computational mathematical models of reactors "BR-1200" and "ODEK".*

**Keywords:** "URANIA" system, integration, integral computational mathematical model, computational research, computational results.

Сумароков Сергей Вячеславович, заведующий отделом.

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

Кечков Алексей Александрович, ведущий инженер.

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

Грошев Тимофей Андреевич, инженер.

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

Кириенко Святослав Олегович, руководитель направления.

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

Статья поступила в редакцию 13 марта 2022 г.

УДК 629.7.01

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_2\_47

EDN: DHZYKZ

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕМА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

И. В. Воронцова

АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара, Россия

*Рассмотрен процесс создания конструкторской документации в едином информационном пространстве предприятия. Собраны и проанализированы статистические данные по созданию объемов проектной и конструкторской документации изделия РКТ. Проанализированы различные подходы к проектированию — "эволюционный" подход и технология "попадания точно в цель" ("concurrent desing"). Разработана математическая модель, которая формализует объем проектно-конструкторских работ во времени, в целях сокращения сроков проектирования и разработки конструкторской документации с "первого захода". На реальном примере уже созданного изделия проведен анализ проектно-конструкторских работ, выявлены различные причины торможения процесса выпуска комплекта КД на изделие. Даны рекомендации по применению технологии "точного попадания", в целях минимизации доработок конструкторской документации в процессе проектирования. Предложена спиральная методика контроля и прогнозирования процесса проектирования, основанная на разработанной математической модели.*

**Ключевые слова:** проектирование, конструкторская документация, "точное попадание", спиральная методика, цифровой двойник изделия.

### Основные понятия

Определения основных понятий, используемых в данной работе.

**Проектирование** — творческий наукоёмкий процесс, деятельность которого направлена на выбор такой структуры и таких параметров создаваемого изделия, которые удовлетворяют все предъявляемые к нему требования.

**Конструкторская документация (КД)** — совокупность конструкторских документов, содержащих данные, необходимые для проектирования (разработки), изготовления, контроля, приёмки, поставки, эксплуатации, ремонта, модернизации, утилизации изделия [1].

**Проектная КД** — КД, выполненная на стадиях технического предложения, эскизного и технического проектов [2]. Проектная документация — документация, разработанная проектными подразделениями на этапе создания рабочей документации [2].

**Основной комплект КД** — объединяет КД, относящуюся ко всему изделию (составленную на все данное изделие в целом), например сборочный чертеж, принципиальная электрическая схема, технические условия, и т. д. [3].

**Извещение об изменении (ИзвИзм)** — документ, содержащий сведения, необходимые для внесения изменений в подлинники конструкторских (технологических) документов, их замены или аннулирования, в том числе причину и срок внесения изменений, а также указания об использовании задела изменяемого изделия [4].

**Онтологический подход** — это научное направление, которое включает в себя: исследование понятийного аппарата и разработки на его основе тезауруса, анализ критериев и моделей проектируемого объекта, методов и сцена-

риев проектирования, сбор и обработку информации об объекте как системы и составляющих его элементах [5].

**Математическая модель (ММ)** — совокупность расчетных методов, алгоритмов и программ, а также экспериментальных данных и другой дополнительной информации, которые позволяют вычислить значение целевой функции в любой точке пространства проектных переменных и ответить на вопрос о принадлежности этой точки к области допустимых проектов [6].

**Объем** — это аддитивная функция от множества (мера), характеризующая вместимость области пространства, которую оно занимает.

**Конечно-элементная модель (КЭМ)** — высокоточная ММ, учитывающая напряженно-деформированное состояние изделия, основанная на методе конечных элементов [6].

**"Эволюционный" метод проектирования** — метод, основанный на преемственности данных (технических решений, материалов и т.п.), используемых от изделия к изделию. Создаваемые при этом ММ (проектная и КД) постоянно дорабатываются на каждом последующем этапе проектирования, постепенно приближаясь к окончательному варианту [6].

**Технология "точного попадания"** — технология, основанная на создании высокоточных ММ и применении КЭМ на ранних этапах проектирования изделия [6].

**Адекватность ММ** — соответствие ММ экспериментальным данным по выбранному критерию [7].

**Цифровой двойник** — это виртуальная интерактивная копия реального физического объекта или процесса, которая помогает эффективно управлять им, оптимизируя бизнес-операции [8].

### Инновационное проектирование

В эпоху 4-й промышленной революции [9] "эволюционный" подход проектирования можно считать исчерпанным. Под влиянием технического прогресса он трансформируется в новую проектную парадигму — "*concurrent design*", что можно перевести как "проектная технология точного попадания" [6]. В свою очередь информационное общество Индустрии 4.0 ориентировано главным образом на осуществление автоматизации физических процессов. Внедрение и использование цифровых технологий на всех этапах проектирования позволяет достигнуть желаемых результатов — выпустить комплект КД за минимальные сроки с максимальными показателями эффективности, т. е. с минимальным количеством доработок.

Переход к Обществу 5.0 состоит в объединении ресурсов социума в целом через интеграцию физического и кибернетического пространств и базируется на искусственном интеллекте, автоматизации процессов коммуникации и сотрудничестве людей и интеллектуальных систем [9]. Процесс проектирования КД претерпит существенные изменения: цифровые двойники будут основной "документацией" на изделие, интеллектуальные системы, обеспечивающие поддержку принятия конструкторских решений, помогут принять решения по ситуации с использованием разнообразных баз знаний, производство сложных деталей на различные изделия будет осуществляться с помощью аддитивных технологий [10]. На текущем этапе развития идёт подготовка к переходу в "роботизированный" мир инновационного проектирования, в котором стоят задачи повышения качества создаваемой продукции, снижения сроков проектирования и стоимости изделия в целом вследствие минимизации количества доработок. Овладев технологией "точного попадания" можно приблизиться к переходу в новую эпоху 5-й промышленной революции. Целью данной технологии является минимизация ошибок в КД и снижение затрат на их устранение, а одним из "инструментов" для её применения является спиральная методика, которая основана на ММ объема КД. Человек по-прежнему остается в автоматизированной среде проектирования слабым звеном (качество его мышления не улучшилось, аналитические способности не повысились, образовательная подготовка заметно упала). При этом значительно возросли новые владения компьютерной техникой, но это слабо влияет на улучшение качества конструкторских разработок [11].

Ключевым моментом технологии "точного попадания" является создание конечно-элементной модели (КЭМ), начиная с ранних стадий проектирования изделия, в отличие от эволюционного метода, где модели создаются в процессе рабочего проектирования. Это позволяет существенно сократить доводочные работы и изменить роль испытаний. В этом и заключает-

ся главный смысл проектной парадигмы — "попадания точно в цель" [6]. Особенностью точного проектирования является адекватная ММ, которая максимально отражает действительность. Для построения такой модели необходимо четко уяснить задачу проектирования, правильно математически сформулировать ее, выбрать проектные переменные (параллельно происходит выбор целевой функции и установка определенных ограничений). Изначально, в самом начале процесса проектирования, не все условия и режимы функционирования могут быть известны, и впоследствии этого человек рискует на практике создать неработоспособные, ненадежные или неэффективные технические объекты [11].

Разработка КД — это итерационный процесс, в котором невозможно создать весь комплект документации сразу. КД — это "живой" проект, который постоянно обновляется по мере того, как проектанты и конструктора наполняют его различными данными об изделии. Разработчики документации должны создать гибкую и доступную структуру взаимодействия между собой — любой член команды должен иметь возможность обновлять документацию без особых усилий [12].

### Спиралеобразность процесса проектирования КД

Идея цикличности и спиралеобразности жизненных процессов обсуждалась видными философами XIX в. Так одной из ведущих идей Гегеля [13] был принцип развития по спирали, провозглашающий направленное поступательное движение от низших форм материи к высшим, что можно считать процессуальной моделью.

Известны два типа спиралей: плоские и пространственные (3-х мерные). Для процессов, имеющих начало и окончание, можно выделить 3-х мерную сходящуюся коническую спираль, которая соответствует философской трактовке жизненных процессов и истории развития человечества в ряду процессуальных моделей.

Коническая модель истории эстахологична — она подразумевает "финал" истории [14], применительно к исследуемой задаче завершения процесса разработки КД.

Разработка КД является одной из стадий жизненного цикла (ЖЦ) изделия. Наиболее распространенными моделями ЖЦ являются каскадная, спиральная, икрементная [15]. Сам процесс проектирования является итерационным с уточнением взаимосвязанных параметров. Предпочтительной моделью ЖЦ для процесса создания КД является спиральная модель, т. к. каждую созданную итерацию можно представить в виде нового витка спирали, в которой специалисты, находящиеся в едином информационном пространстве (ЕИП), постоянно разрабатывают новую версию, проходя в такой работе на каждом витке спирали стандартные этапы,

учитывая мнения различных специалистов предприятия. Каждый последующий виток спирали повторяется во времени, но при других условиях (как стартовых, так и текущих). На нём уточняются цели и характеристики проекта, определяется его качество и планируются работы следующего витка спирали. Неполное завершение работ на каждом этапе позволяет переходить на следующий этап, не дожидаясь завершения работ на текущем этапе.

Описанный принцип распространен в данной работе на процесс разработки КД для изделия ракетно-космической техники (РКТ) и представляется, как циклический (ритмичный) и спиралеобразный. Из двух типов спиралей, в данном случае, наиболее информативной является сходящаяся 3-мерная коническая спираль, у которой есть начало и конец, и есть проекция на геометрическую плоскость, которая представляет собой изображение витков по конусной поверхности в виде спирали. Вид спирали характеризует динамичность процесса разработки КД с равномерным шагом — архимедова спираль, которая будет соответствовать ритмичному планируемому ходу работ проектных и конструкторских подразделений. Изменение шага соответствует нарушению планируемого ритма (темпа).

Поскольку конус и конусная спираль являются геометрическими фигурами, которые поддаются математическому описанию, а сам процесс разработки КД можно представить эволюционным и циклическим, то на этой базе можно создать ММ процесса создания КД в виде объемной конусной сходящейся спирали и конической поверхности, где:

- объем конуса — это полный комплект КД, разработанный на конкретное изделие, на этапе проектирования и конструирования, заключенный в коническую оболочку;
- сходящаяся спираль, описывающая конус, — это траектория, характеризующая ритмичность и плановность хода процесса разработки КД.

### ММ объема КД

С целью апробации на фактических данных статистики для обсуждения и конкретизации предлагаемых идей, необходимо рассмотреть завершённый процесс разработки КД на реальное изделие РКТ, которое было разработано в системе автоматизированного проектирования с использованием системы управления инженерными данными в ЕИП предприятия. Данные, полученные автором, занесены в табл. 1 (проектная документация) и табл. 2 (конструкторская документация) соответственно. Весь объем КД при этом составил  $V_{\text{КД общ.}} = 12652$  единиц наименований документов с учётом извещений об изменении на корректировку. Время разработки КД на изделие составило 6 лет с учётом доработок КД по ИзвИзм.

Для этого изделия, учитывая большой объем доработок проектной и рабочей документации, их аннулирование и повторную разработку, можно утверждать, что ММ не были работоспособными и достоверными, а проектирование велось традиционным "эволюционным" методом. Данный метод проектирования будет отражен в модели "Как есть". Современное поколение конструкторов/расчетчиков не всегда осознают, что их задача — это не виртуозное владение компьютером, а способность правильно задать компьютеру вопрос, для чего нужно знать большую часть ответа [11].

Всю разработанную документацию можно условно разделить на две части — не имеющую доработок и документацию, которая дорабатывалась по ИзвИзм.

Основными причинами для доработки являлись замечания, которые выявились в процессе разработки рабочей документации конструкторскими подразделениями и производством в процессе изготовления изделия. Они касались доработки проектной и рабочей КД вследствие неправильно принятых проектных и конструкторских решений, что соответственно привело к увеличению объемов КД и сроков проектирования.

Таблица 1

#### Проектная документация

Год разработки изделия	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
Общий объем документации с учетом ИзвИзм	446	222	68	6	3	0
Объем документации, измененной по ИзвИзм	96	87	22	1	1	0
Документация без доработок по ИзвИзм	350	135	46	5	2	0

Таблица 2

#### Конструкторская документация

Год разработки изделия	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
Общий объем КД с учетом ИзвИзм	6334	4347	914	231	63	18
Объем КД, измененный по ИзвИзм	1170	2316	351	64	24	5
Объем КД без доработок по ИзвИзм	5164	2031	563	167	49	13



### Построение ММ для завершеного процесса разработки КД

Для построения модели "Как есть" по результатам статистики необходимо составить табл. 3. При построении по указанным в таблице данным получится 2D-изображение в геометрическом масштабе, соответствующее объемам КД по годам рис. 1.

Геометрические размеры ММ для наглядности приведены в миллиметрах и рассчитаны по результатам формализации процесса разработки КД, исходя из известного объема КД и временного периода, с применением масштабного и переводного коэффициентов.

Координаты точки по осям  $X$  и  $Y$  характеризуют положение точки в проекции на плоскость  $XOY$  в момент произвольного "среза", которые характеризуют радиусы усеченных конусов в этот момент времени.

$Z$  — ось времени проектирования изделия.

$X$ ,  $Y$  и  $Z$  — оси, в совокупности характеризующие численный суммарный объем КД.

3-мерная модель будет представлять ломаную коническую поверхность. Любая точка на

поверхности модели имеет 3 координаты  $(x; y; z)$ , по которой можно рассчитать объем выпущенной КД в любой текущий момент времени.

Каждая точка на поверхности отражает объем КД в определенный момент времени.

Конус (полный или усеченный) характеризует объем выпущенной КД за один год работы, а каждая точка на спирали, описывающей конус, даёт возможность оценить ритмичность и равномерность конструкторских работ по конкретному изделию в любой текущий момент времени.

Руководствуясь принципом спирального развития процессов, можно описать конусную поверхность модели объема КД спиральной траекторией [16], где траектория движения точки по сходящейся конической спирали [17] будет отражать процесс проектирования КД во времени. По координатам точки можно рассчитать время и разработанный объем КД.

Уравнение траектории движения (1) по конической спирали (рис. 2) было выведено в рамках работ по разработке ММ объема КД на изделие (сам вывод уравнения выходит за рамки данной работы).

Таблица 3

Объем выпущенной КД по годам

Год проектирования	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
Общий объем КД по годам	$V_1 = 6780$	$V_2 = 4569$	$V_3 = 982$	$V_4 = 237$	$V_5 = 66$	$V_6 = 18$

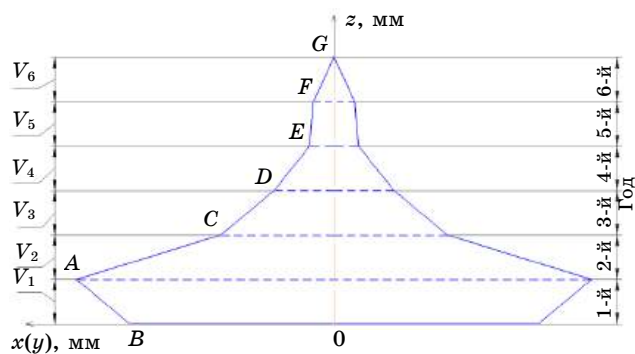


Рис. 1. 2D-изображение модели "Как есть"

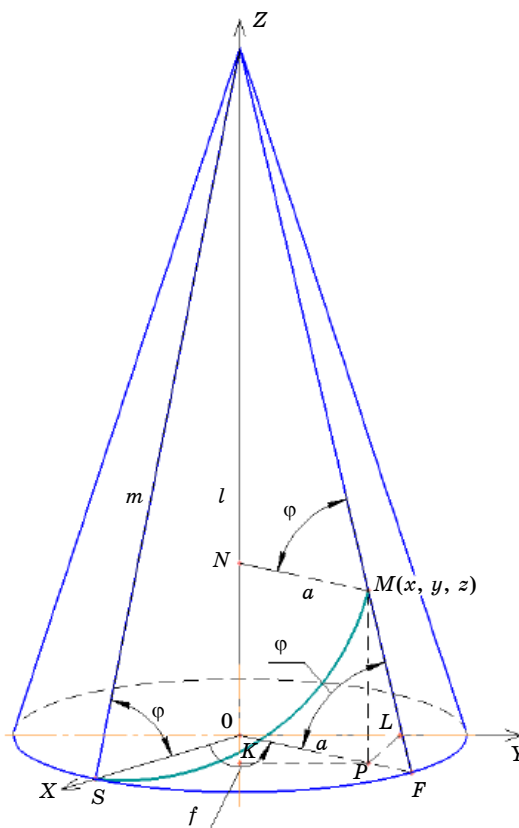


Рис. 2. Движение точки по конической спирали

Координаты точки М, движущейся по конической спирали, будут иметь вид:

$$\begin{cases} x = (H - bt) \operatorname{ctg} \varphi \cos t, \\ y = (H - bt) \operatorname{ctg} \varphi \sin t, \\ z = bt \end{cases} \quad (1)$$

где  $H = l$  — высота конуса;

$b = MP$  — длина отрезка, на который переместится точка вдоль прямой  $m$  за промежуток времени, в течении которого отрезок повернется вокруг начала координат на 1 радиан;

$t$  — угол поворота точки вокруг начала координат;

$\varphi$  — угол между образующей конуса и плоскостью  $XOY$ .

В данном случае процесс разработки КД на изделие разбит на 6 этапов по годам, 1 виток спирали соответствует одному году разработки КД на основании имеющейся статистики по количеству выпущенных документов за год.

Для модели "Как есть" проекция спирали на горизонтальную плоскость  $XOY$  будет иметь по годам неравномерный шаг рис. 3.

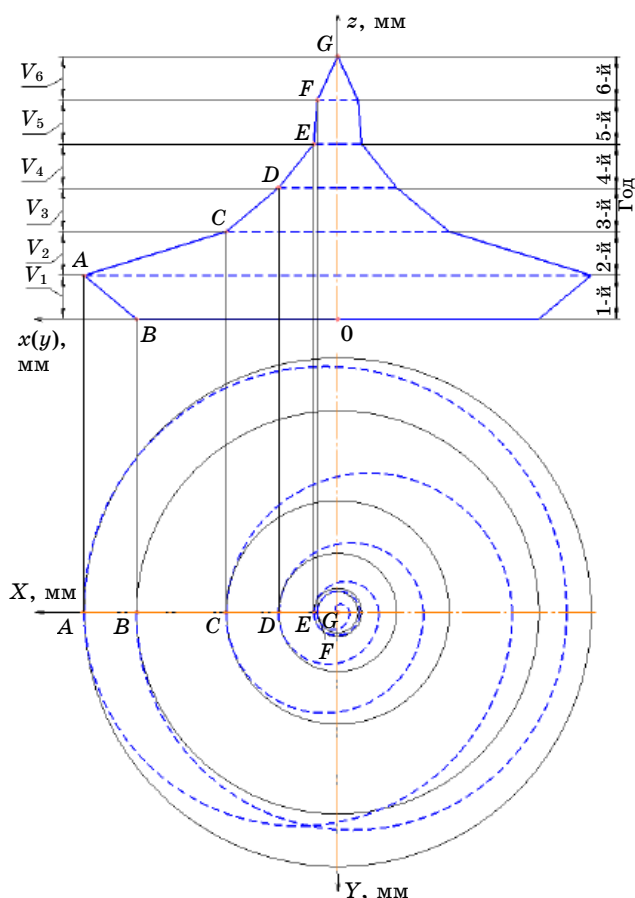


Рис. 3. Проекция спирали на плоскость  $XOY$  модели "Как есть"

$AB, BC, CD, DE, EF, FG$  — этапы проектирования КД (6 лет);

Точки  $A, B, C, D, E, F, G$  расположены на концентрических окружностях, которые обозначают переход от одного витка спирали к другому;

$B$  — начало спирали;

$G$  — конец спирали.

Всего 6 витков, что соответствует 6-ти годам выпуска КД на изделие.

Из получившихся моделей видно, что процесс разработки КД на изделие происходит скачкообразно.

1. В основании модели получился усеченный конус, радиус нижнего основания которого меньше верхнего. Данный этап разработки КД трудно поддается формализации в виду того, что он уже в прошлом, и мы можем только предположить факторы, которые повлияли на него. Самый основной фактор, требующий внимания, — это стартовые условия для начала проектирования (организационно-технические ресурсы). К ним можно отнести: достаточность кадрового состава, наличие и качество онтологического анализа, качество проработки задач на начальный момент, полнота исходных данных, наполненность базы заимствования ММ с другого изделия, наличие базы стандартных и покупных изделий, наличие базы параметрических моделей, которые позволяют избежать повторное их построение за счет изменения значений тех или иных параметров, и т. д. Трудоемкость построения параметризованных моделей "окупается" за счет уменьшения доли рутинного труда специалиста высокой квалификации;

2. Большой скачок между 2-м и 3-м годами разработки;

3. Нет равномерности распределения работ в целом.

Такие ситуации могли произойти по следующим причинам:

- торможение работ конструкторов в связи с доработками проектной документации на изделие;
- занятость конструкторов/проектантов на нескольких изделиях одновременно;
- дефицит конструкторов в отделе;
- отсутствие КЭМ на ранних этапах проектирования;
- разрыв между квалификацией конструкторов/проектантов и требованиями к изделию;
- неуверенная работа конструкторов/проектантов с прототипами;
- неуверенная работа конструктора/проектанта с компьютерной техникой;
- непрекращающийся поток изменений;
- нехватка информации о покупных изделиях;
- неоптимальное распределение проектно-конструкторских работ по ходу проекта;

- проблемы с ПК или ПО;
- потеря времени на согласование уже разработанной КД [18];
- отсутствие качественного онтологического подхода;
- недостатки в работе смежных предприятий;
- устранение ошибок проектирования и конструирования.

В рамках поставленной задачи по разработке ММ объема КД для исследования процесса выпуска объема КД предлагается оценить ход работ и его визуализировать, когда планирование объемов КД и реализация этих планов проводились бы с использованием спиральной методики.

Исходя из предыдущих расчетов и статистических данных построим (для того же объема КД) модель "Как должно быть". Она будет соответствовать проектированию по технологии "точного попадания" (рис. 4).

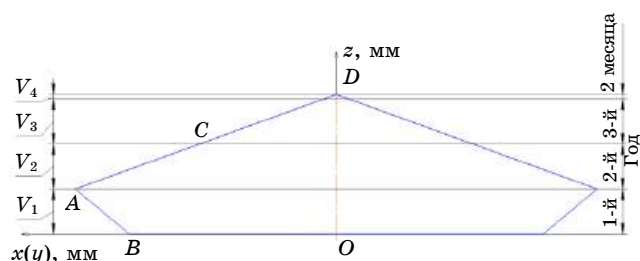


Рис. 4. 2D-изображение модели "Как должно быть":  $V_1$  — объем КД за 1-й год проектирования;  $V_2$  — объем КД за 2-й год проектирования;  $V_3$  — объем КД за 3-й год проектирования;  $V_4$  — объем КД за 4-й год проектирования составил 2 месяца

Общее время выпуска аналогичного объема КД на изделие составило 4 года 2 месяца.

Первый год проектирования модели "Как должно быть" следует считать аналогичным первому году проектирования модели "Как есть". Это обусловлено тем, что стартовые (начальные) условия остаются прежними. Оставшийся объем работ по выпуску КД при равномерном распределении работ соответствует конической поверхности без изломов. Сходящаяся коническая спираль, отражающая ход проектно-конструкторских работ, будет иметь по годам постоянный шаг.

Для модели "Как должно быть" проекция спирали на горизонтальную плоскость  $XOY$  будет иметь вид, представленный на рис. 5.

$AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  — отрезки, обозначающие годы проектирования (3 года);

Точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  расположены на концентрических окружностях, которые обозначают переход от одного витка спирали к другому.

$B$  — начало спирали;

$D$  — конец спирали;

Всего 3 витка спирали, что соответствует трем годам выпуска КД на изделие.

Для наглядности изображения уменьшения сроков проектирования КД необходимо совместить картинку моделей "Как есть" и "Как должно быть" на одном рисунке (рис. 6).

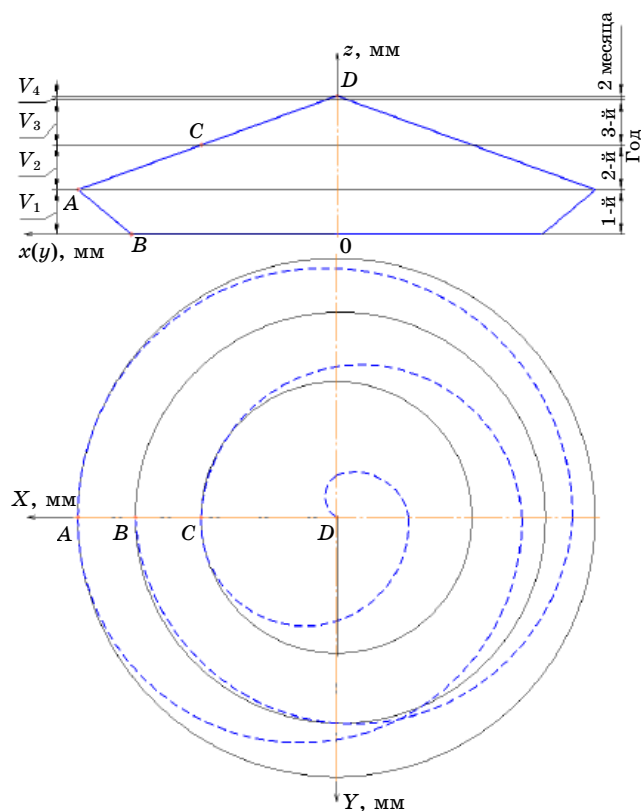


Рис. 5. Проекция спирали на плоскость  $XOY$  модели "Как должно быть"

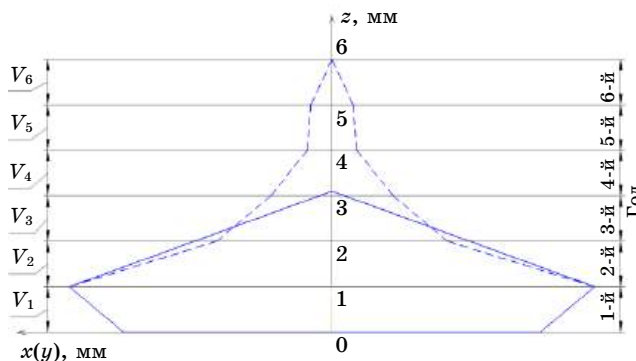


Рис. 6. 2D-модели процессов "Как есть" (---) и "Как должно быть" (—)

Исходя из полученных моделей можно сделать вывод, что при проектировании традиционным "эволюционным" методом, процесс выпуска комплекта КД составил 6 лет, а при работе по технологии "точного попадания" с применением спиральной модели планирования работ — 3 года 2 месяца. Срок разработки КД сократился в 2 раза из-за снижения количества доработок КД по причине устранения ошибок вследствие неправильно принятых решений.

В целях проверки достоверности этого вывода проведен сравнительный анализ результатов по срокам разработки КД, полученных по двум методикам — с помощью предлагаемой спиральной ММ процесса разработки КД и по расчетному алгоритму, приведенному в [19]. Полученные результаты абсолютно идентичны. Срок разработки КД реального изделия завышен на 60 %.

Учитывая изложенное, в дальнейшем при создании нового изделия с использованием прототипа и учитывая коэффициент сложности, рекомендуется построить спиральную модель процесса разработки КД "Как должно быть" с равномерным шагом на основании которого назначить научно обоснованные сроки выпуска документации с учетом возможных рисков. Далее по ходу выполняемых работ при известном объеме разработанной КД в необходимый момент времени, руководствуясь этой моделью, можно построить фактическую модель и определить траекторию движения точки по конической спирали, которая будет отслеживать процесс разработки КД во времени. По полученным координатам можно определить в "конусе" находится конструкторский отдел или разработка КД идет с нарушением графика, и подразделения работают недостаточно эффективно.

#### Построение ММ для планируемого объема КД на новое изделие

Для визуализации работы ММ, используя существующий прототип с известным объемом КД, необходимо построить модель, прогнозирующую будущий процесс проектирования КД на новое изделие РКТ "Как должно быть" (рис. 7). Сделаем контрольный срез через точку *B*. Условный временной интервал среза задан произвольно — 1 год (точка *B*).

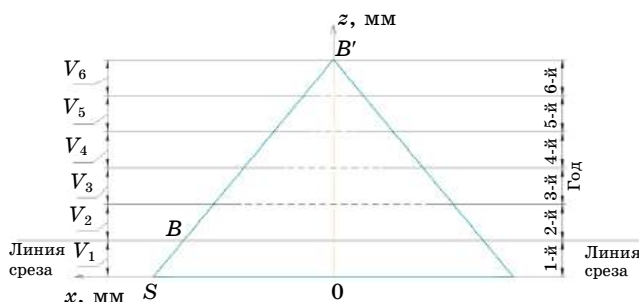


Рис. 7. 2D-модель процесса "Как должно быть" для нового изделия

Точка *B* будет отражать текущий момент проектирования КД, точка *B'* — конец проектирования, объем основного комплекта КД (по полученной статистике прототипа) на момент среза составил 6780 единиц наименований документов.

Для большей визуализации построим 3D-модель, характеризующую весь объем КД на изделие рис. 8.

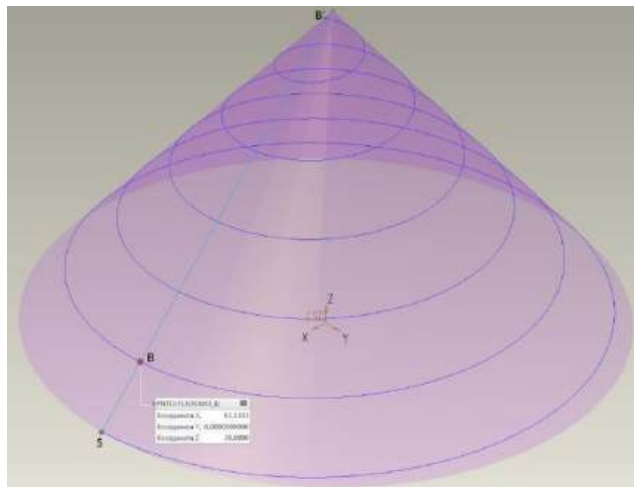


Рис. 8. 3D-модель процесса "Как должно быть" для нового изделия

Произвольная точка на поверхности модели имеет координаты (*x*; *y*; *z*), по которым можно рассчитать объем выпущенной КД в текущий момент времени, соответствующий данной точке. И наоборот по текущему известному объему выпущенной КД можно вычислить координаты точки и построить через нее восходящую коническую спираль с любым выбранным шагом, которая будет отражать динамику процесса проектирования КД в данный момент времени, что позволит спрогнозировать время завершения выпуска полного комплекта документации.

Точка *B* (83,3; 0; 20) (рис. 8) характеризует 1 виток спирали, который согласно срезу соответствует одному году проектирования изделия (координата по оси *Z* = 20).

$$\text{точка } B \begin{cases} x = 83,3; \\ y = 0; \\ z = 20, \end{cases}$$

где *x* и *y* — координаты, характеризующие численный объем разрабатываемой КД;

*z* — время проектирования изделия.

Данная модель характеризует идеальный (планируемый) случай (модель "Как должно быть"), к которому необходимо стремиться, но в реальной жизни может никогда не быть. На практике при построении ММ заверченного процесса проектирования образующая конуса из прямой линии превращается в ломаную, соответственно сам конус принимает вид представленный на рис. 1.

В связи с этим следует рассмотреть 2 варианта модели "Как есть", характеризующие отклонения от плана — объем КД, разработанный за 1 год меньше планируемого и объем КД, разработанный за 1 год, больше планируемого.



Для этих случаев изобразим на одном рисунке модели "Как есть" и "Как должно быть" (рис. 9).

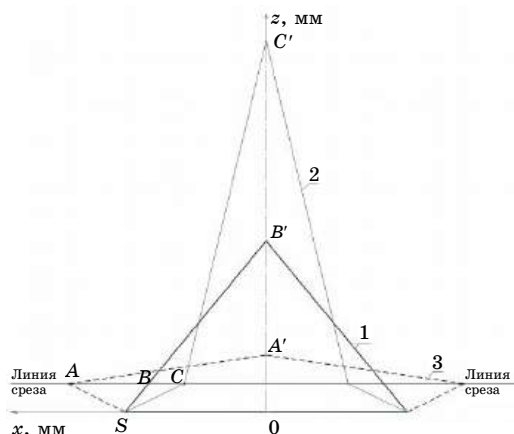
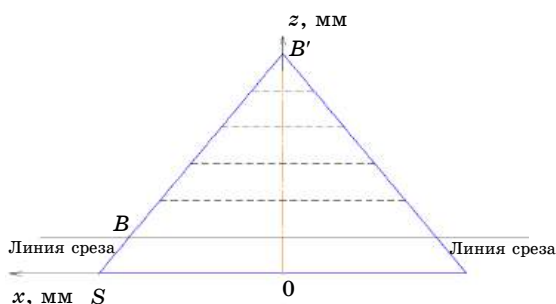


Рис. 9. Прогнозируемые модели "Как есть" и "Как должно быть"

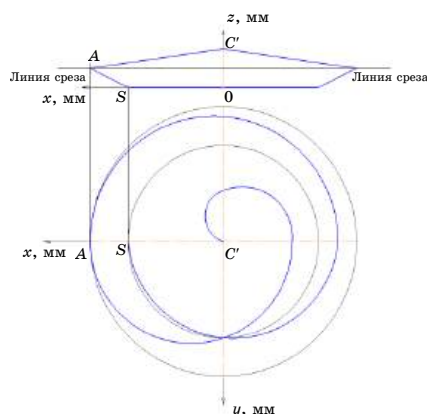
Модель № 1 — планируемая модель "Как должно быть". Объем КД для этой модели на момент среза (момент времени 1 год) составил 6780 (соответствует прототипу).

Модель № 2 — модель "Как есть", если на момент среза объем КД составил 4000 единиц наименований документов, т. е. меньше, чем должно было быть согласно плану.

Модель № 3 — модель "Как есть", если на момент среза объем КД составил 9000 единиц наименований документов, т. е. больше, чем должно было быть согласно плану.



Модель № 1 (текущий объем КД в точке B соответствует плану)



Модель № 3 (текущий объем КД в точке A больше планируемого)

Точка A (140; 0; 20) — характеризует процесс влияния на конечный срок увеличенного объема проектирования КД на момент среза в модели № 3. Точка находится за пределами конусной поверхности модели № 1.

Точка B (83,3; 0; 20) — характеризует процесс влияния на конечный срок планового проектирования КД на момент среза в модели № 1. Точка находится на конической поверхности.

Точка C (58; 0; 20) — характеризует процесс влияния на конечный срок заниженного объема проектирования КД на момент среза в модели № 2. Точка находится внутри конусной поверхности модели № 1.

Точка A' (0; 0; 35) — характеризует окончание процесса проектирования КД для математической модели № 3 вследствие снижения сроков проектирования из-за текущего увеличенного объема выпускаемой КД.

Точка B' (0; 0; 120) — характеризует окончание процесса проектирования КД для математической модели № 1. Отражает плановый срок проектирования.

Точка C' (0; 0; 260) — характеризует окончание процесса проектирования КД для математической модели № 2 вследствие увеличения сроков из-за выпуска промежуточного заниженного объема КД.

Построим проекцию спирали на плоскость XOY для каждой математической модели (модель № 1, 2, 3) (рис. 10).



Модель № 2 (текущий объем КД в точке C меньше планируемого)

Рис. 10. Проекция спиралей моделей № 1, 2, 3 на плоскость XOY

Исходя из построенных моделей можно сделать вывод, что, если на этапе соответствующему точке В проектирования КД, был разработан объем КД меньше планируемого (модель № 2), то срок разработки основного комплекта КД существенно возрастет (13 лет вместо 6). И напротив, если за данный этап разработки КД на изделие выпущен объем КД больше планируемого (модель № 3), то время выпуска полного комплекта КД уменьшается (2,5 года вместо 6-ти). Это наглядно демонстрирует как работает ММ, описывающая объем проектно-конструкторских работ (рис. 9). Общий объем КД (объемы "конусов") и стартовые условия приняты одинаковыми, но время окончания разработки, как показали расчеты, меняется в зависимости от фактического хода работ, отличного от планируемого. Количество изломов (один излом) конусной поверхности для наглядности взят в единичном количестве. На практике таких изломов будет больше, и для каждой поверхности будет свой шаг конусных спиралей, свидетельствующий об отклонении срока проектирования от планируемого.

### Заключение

Невозможно полностью исключить доработки и корректировки КД, ибо нет предела для совершенствования. Производя компьютерные вычисления, необходимо заботиться о максимальном снижении доли человеческих ошибок в исходных данных и повышении знаний о физической природе мира [11]. В данной работе приводится статистика и иллюстрируется увеличение объема КД при завышении сроков проектирования вследствие ошибочных конструкторских решений, которые приняты без достаточной проработки задачи по созданию изделия. Кроме того, поднимается актуальный вопрос контроля эффективности и прогнозирования хода проектно-конструкторских работ, в целях решения которого предлагается использовать ММ процесса разработки КД. Спирально-коническая методика универсальна и может применяться во всех организациях, где ведется разработка КД. Она позволяет:

- Спрогнозировать и обосновать время разработки полного комплекта КД на изделие, опираясь на статистику по прототипам с учетом коэффициента сложности;
- Оперативно контролировать ход проектно-конструкторских работ в любой текущий момент времени, оценить насколько эффективно работает подразделение проектантов/конструкторов, проанализировать насколько реальный (фактический) процесс отклоняется от планируемого, как это влияет на увеличение или сокращение конечных сроков и своевременно принять соответствующие адекватные меры в целях выполнения директивных сроков выпуска КД на изделие;

- При необходимости можно разбить процесс создания КД на изделие на любое количество промежуточных этапов в целях мониторинга хода работ (в данной работе разбито по годам, модель позволяет каждый год разбить по месяцам, тогда каждый виток спирали будет соответствовать одному месяцу проектирования изделия, каждый месяц разбить на дни и т.д.) и отследить состояние процесса разработки КД в любой текущий момент времени с точностью до дня.

*Автор благодарит д-ра техн. наук  
В. А. Комарова (Самарский университет)  
и канд. техн. наук А. Н. Филатова  
(АО "РКЦ "Прогресс") за помощь  
в данной работе.*

### Литература

1. ГОСТ 2.001-2013 Единая система конструкторской документации. Общие положения. Дата введения 2014-06-01.
2. ГОСТ 2.103-2013 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. Дата введения 2015-07-01.
3. ГОСТ 2.102-2013 Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов. Дата введения 2014-06-01.
4. ГОСТ 2.503-2013 Единая система конструкторской документации. Правила внесения изменений. Дата введения 2014-06-01.
5. *Боргест Н. М.* Онтология проектирования самолета // Искусственный интеллект. 2011. № 4. С. 260—265.
6. *Комаров В. А.* Точное проектирование // Онтология проектирования. 2012. № 3. С. 8—23.
7. ГОСТ 24026-80 Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. Дата введения 01.01.81.
8. Концепция применения и развития инженерного анализа, математического и компьютерного моделирования, создания цифровых двойников изделий РКТ. Утверждена распоряжением Государственной корпорации по космической деятельности "Роскосмос" от 29.12.2020.
9. *Сойфер В. А.* Human Factor // Онтология проектирования. 2021. № 1. С. 8—19.
10. *Шваб К.* Четвертая промышленная революция. — М.: Эксмо, 2016. — 118, 127 с.
11. *Похабов Ю. П.* Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4.0. // Онтология проектирования. 2019. Т. 9. № 1(31). С. 24—35. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-1-24-35.
12. *Babich Nick.* Design Documentation: Why You Need It. Xd. Ideas. April 22, 2020. <https://xd.adobe.com/ideas/principles/web-design/design-documentation/>.
13. *Брянник Н. В. и др.* Диалектическое отрицание как закономерность связи, движения и развития: сб. науч. тр. — Свердловск: Изд. УрГУ, 1984. С. 33, 48, 49.
14. *Александров Н. Н.* Основные понятия циклической парадигмы / <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0016/001c/00162012.htm>.



15. Боргест Н. М. Социально-экономический эффект онтологического анализа при создании информационных систем // Онтология проектирования. 2021. Т. 11. № 1(39). С. 35—50. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-35-50.

16. Клековкин Г. А. Пространственные спирали // Матем. обр. 2019. № 2(90). С. 20—30.

17. Виноградов И. М. Математическая энциклопедия. — М., 1977. — 706 с.

18. Воронцова И. В., Филатов А. Н., Комаров В. А. Автоматизированное управление конструкторскими данными в ЕИП предприятия: матер. науч.-технич. конф. "Перспективные информационные технологии 2015". — Самара: СГАУ, 2015. С. 156.

19. Филатов А. Н. Модели и анализ процессов нисходящего проектирования изделий ракетно-космической техники: мат. науч.-технич. конф. "Перспективные информационные технологии 2013". — Самара: СГАУ. С. 74—82.

## MATHEMATICAL MODEL OF DESIGN DOCUMENTATION DEVELOPMENT PROCESS

I. V. Vorontsova

JSC Space Rocket Centre Progress, Samara, Russia

*The article focuses on the process of design documentation development in an enterprise's common information space. Statistical data on design and engineering documentation of rocket and space equipment development are gathered and analyzed. Also, different design approaches are reviewed, namely an evolutionary approach and concurrent design technology. A mathematical model simulating design workflow over time is worked out in order to shorten period of design and engineering documentation development "done in one go". Based on a real-life example of already existing product, design and engineering activities are analyzed as well as various reasons of slowing-down of design documentation release are found out. Moreover, recommendations are given on how to apply a concurrent design technology in order to minimize reworks of the engineering documentation in the process of design. A spiral technique of design process control and forecasting based on the developed mathematical model is offered.*

**Keywords:** design, design documentation, "precise hit", spiral technique, digital twin of the product.

---

Воронцова Ирина Викторовна, инженер-программист.  
E-mail: Vorontsova.irina1988@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14 марта 2022 г.

УДК 338.364

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_2\_57

EDN: EIRJXN

## ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. О. Бутко, канд. техн. наук

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

*Рассмотрены особенности разработки программных средств для комплексного моделирования и анализа надежности и безопасности технических систем различного назначения. Данная задача решалась на основе многообразных технологий, обеспечивающих разный уровень точности и достоверности. Основной особенностью новых вариантов решений является применение современных сред разработки и расчетных методик на основе различных библиотек. Комплекс представленных модулей может быть использован в любой производственной сфере, которая требует повышенного контроля надежности и безопасности в целях минимизации отказов и аварий.*

**Ключевые слова:** автоматизация, программирование, технические системы, инженерные расчеты, надежность, безопасность, вероятностный анализ, структурное моделирование, логическое моделирование, базы данных.

Современные технические изделия представляют собой сложные и комплексные системы, состоящие из множества связанных друг с другом различных элементов, число которых может достигать сотен тысяч и более. В то же время требования по эффективности функционирования и качеству производимых изделий ужесточаются. Это прямо связано с риском возникновения опасностей, аварий и катастроф при эксплуатации технических систем (ТС) [1].

Повышение эффективности и качества проектируемых ТС невозможно без высокой надежности технических средств управления, что является первой причиной возрастания фактора надежности в условиях развития техники и проектировании сложных систем различного назначения.

Второй причиной, требующей повышения надежности, является возрастание сложности ТС. Внутренняя и внешняя аппаратура состоят из огромного числа разнородных элементов и в связи с этим возникает трудность в обслуживании, жесткости условий их эксплуатации и ответственности задач, которые на них возлагаются. Стоимость эксплуатации ТС может во много раз превзойти стоимость их разработки и изготовления.

И, последнее, — надежность ТС определяется надежностью комплектующих элементов, поэтому знание основных вопросов надежности элементной базы является необходимым условием успешной работы в области Computer Science [2].

Моделирование сложных систем позволяет исследовать особенности их функционирования в различных условиях, наделять их требуемыми характеристиками и снижать риск возникновения отказов ТС или их подсистем.

В математической модели исследуемой системы должны быть представлены основные элементы, по поведению, качеству и эффективности функционирования которых можно достоверно судить обо всей системе.

### Характеристика организационной структуры объекта и структура предметной области

В качестве предметной области выступает область деятельности человека, связанная с обеспечением технических систем надлежащей степенью их эффективного функционирования. В связи с этим необходимо произвести анализ:

- параметров надежности при создании принципиально новой ТС, не имеющей существующих аналогов (необходимо найти наиболее близкие к абсолютным значения параметров надежности);
- параметров надежности при разработке ТС, для которой есть существующие аналоги, данные по эксплуатации которых возможно учесть при вычислениях (вполне достаточно расчета приближенных значений параметров надежности нескольких вариантов, принимая во внимание условия эксплуатации для определения наиболее оптимального решения);
- параметров надежности при модернизации, уже существующей ТС без смены условий функционирования для повышения надежности (целью становится сравнительная оценка параметров надежности и выработка решения по реконструкции ТС для достижения повышения показателей надежности);
- последствий отказов некоторых элементов ТС для получения возможности конструктивно и/или другими средствами снизить вероятность появления более опасных ситуаций.

Перед проектировщиком и системным аналитиком ставится следующий комплекс задач:

- описание проектируемой системы;
- определение схемы функциональной целостности (СФЦ) для каждой из ее главных подсистем и функций;
- определение параметров надежности элементов;
- задание логических критериев реализации функций (ЛКФ);
- анализ результатов расчетов;
- выработка и реализация проектных решений и подготовка отчетов.

Основное содержание этапа постановки задач расчета надежности проектируемой системы характеризуется схемой, представленной на рис. 1 [3].

Окончательную формализованную постановку задачи осуществляет системный аналитик. На основе полученного от разработчика описания системы, для каждой ее функции он строит схемы функциональной целостности, задает логические критерии функционирования, фиксирует параметры надежности элементов и уточняет перечень рассчитываемых показателей надежности системы. Главное место в постановке задач автоматизированного структурно-логического моделирования надежности занимает построение схем функциональной целостности для каждой заданной выходной функции проектируемой системы [4].

#### Характеристика существующей системы обработки информации. Функции и методы сбора, передачи, хранения, обработки, отображения информации

Основными функциями, относящимися к рассматриваемой проблеме и поддерживаемые данной ИС, являются:

- регистрация отказов технического оборудования (ТО);
- регистрация устранения этих отказов;
- регистрация решений по списанию (модернизации и т. д.) ТО;
- прочие функции по ведению ремонтных операций.

В терминологии данной ИС каждое регистрируемое событие называется *инцидентом*.

Методы сбора информации автоматизированы в высокой степени. Каждое подразделение, в

котором установлен факт отказа, с помощью компетентного лица через его АРМ регистрирует его (отказ) как инцидент в единой базе ИС, которая периодически просматривается диспетчерами системы. После анализа инцидента диспетчерами заявка через ту же ИС направляется в соответствующее подразделение для ее исполнения. По окончании выполнения заявки процесс развивается по той же схеме, но в обратном направлении.

Передача информации, которой оперирует ИС, осуществляется через вычислительную сеть комбината.

Информация хранится на серверах подразделений, обрабатывается соответствующими инженерами или другими компетентными лицами посредством реализации каких-либо материальных решений по инцидентам.

Отображение информации предоставляется конечным пользователям с помощью WEB-интерфейса, реализованного в системе.

#### Анализ недостатков в обработке информации

Системы такого типа, в том числе и данная система, управляют всем жизненным циклом оборудования, начиная с проектирования, изготовления, монтажа и сборки до последующего обслуживания, сервисных и профилактических работ, модернизации, реконструкции и вывода из эксплуатации. Однако с помощью таких систем невозможно получить количественные показатели, характеризующие надежность технических объектов или их отдельных элементов, а также невозможно проследить цепочки отказов элементов ТО, выявить наиболее опасные отказы, наиболее "слабые" элементы ТО. Именно такой спектр задач и является целью разработки проектируемой системы.

Стоит заметить, что данных по инцидентам, выгруженным из "ИС Управления ИТ услугами" за определенный довольно длительный срок, вполне хватит для определения параметров модели исследуемого технического объекта. При этом требуется понимание структуры этого объекта и логики его функционирования. Причем, чем больше имеется такого понимания, тем более приближена будет аналитическая модель ТО к реальной и, следовательно, точнее будут полученные результаты, рассчитанные по этой модели.



Рис. 1. Схема постановки задачи

Задачей работы стала разработка программного комплекса структурно-логического моделирования и вероятностного анализа надежности и безопасности технических систем, обеспечивающей возможность статического и динамического моделирования, расчета параметров надежности, безопасности и риска для рабочих процессов сложных по структуре систем для различных отраслей промышленности [5].

Цель создания данного комплекса это:

- прогнозирование безотказности структурно-сложных технических систем;
- прогнозирование ремонтпригодности таких систем;
- анализ видов, последствий и критичности отказов ТС и ее элементов;
- анализ обработки статистических данных испытаний, эксплуатации, поддерживающий большой спектр распределений.

В результате должна получиться система, характеризующаяся следующими пунктами:

1. Обеспечение простыми, удобными и наглядными средствами графического моделирования структурных и надежностных схем технических систем.
2. Обеспечение простыми, удобными и наглядными средствами графического моделирования деревьев отказов.
3. Возможность автоматического определения параметров, характеризующих элементы ТС по эмпирическим данным.
4. Интеграция в программном комплексе математического аппарата, способного решать задачи анализа надежности ТС посредством технологии структурно-логического моделирования и технологии анализа дерева отказов.
5. Создание настраиваемых отчетов по результатам работы системы.
6. Включение в программный комплекс оперативной информационно-справочной поддержки конечных пользователей.
7. Общая простота, гибкость и эргономичность интерфейса.
8. Относительно невысокое потребление системных ресурсов и возможность корректной работы на компьютерах стандартной "офисной" конфигурации.

При разработке программного комплекса следует выделить следующие критерии:

- реализация наиболее гибких технологий решения проблем обеспечения надежности и безопасности разрабатываемых систем различных видов, классов и назначения в различные периоды их жизненного цикла;
- ориентация на задание модели исследуемой ТС несколькими способами (в виде блок-схемы и в виде дерева отказов);
- использование широкого спектра распределений для характеристики параметров составляющих элементов ТС.

### Назначение, сфера функционирования программного комплекса (ПК)

Программный комплекс структурно-логического моделирования и вероятностного анализа надежности и безопасности технических систем представляет собой визуальную среду для анализа надежности ТС, предназначенную для автоматизации выполнения мероприятий по обеспечению и управлению надежностью ТС на этапах проектирования, изготовления, и эксплуатации. Программа предназначена для решения следующих задач:

- обоснование количественных требований по надежности к объекту или его составным частям;
- проверка выполнимости установленных требований и/или оценка вероятности достижения требуемого уровня надежности объекта в установленные сроки и при выделенных ресурсах, обоснование необходимых корректировок установленных требований;
- сравнительный анализ надежности вариантов схемно-конструктивного построения объекта и обоснование выбора рационального варианта;
- определение достигнутого (ожидаемого) уровня надежности объекта и/или его составных частей, в том числе расчетное определение показателей надежности или параметров распределения характеристик надежности составных частей объекта в качестве исходных данных для расчета надежности объекта в целом;
- обоснование и проверка эффективности предлагаемых (реализованных) мер по доработкам конструкции, технологии изготовления, системы технического обслуживания и ремонта объекта, направленных на повышение его надежности;
- определение сценария аварий с различными последствиями от различных исходных событий;
- получение графического наглядного материала для практического руководства ведения безопасных работ.

Сфера применения программного комплекса включает в себя подразделения предприятий, имеющие в эксплуатации технические объекты, для которых актуальна проблема повышения или исследования надежности, однако этим сфера применения не ограничивается. Программный комплекс можно применять на стадии проектирования технических объектов, а также, например, для расчета надежности информационных сетей на базе технических средств (компьютеров, сетевого оборудования и т. д.).

Программный комплекс может "генерировать" неявно управленческие решения по отношению к техническим системам, реализация которых может привести к повышению эффективности их функционирования.

### Цели создания программного комплекса и показатели эффективности функционирования объекта автоматизации

Целью создания программного комплекса является реализация наиболее гибких технологических решений проблем прогнозирования безотказности и ремонтпригодности структурно-сложных технических систем, анализа видов, последствий и критичности отказов ТС и ее элементов с возможностью загрузки статистических данных испытаний и эксплуатации.

В результате создания ПК должны быть достигнуты следующие показатели эффективности функционирования объекта автоматизации:

- повышение эффективности ТС за счет реализации выработанных управленческих решений;
- повышение безопасности ТС и/или ее частей.

#### *Перечень автоматизируемых функций.*

Проанализировав назначение и цели создания системы, можно выделить ряд автоматизируемых функций:

- создание моделей исследуемых ТС в виде структурных блок-схем и в виде дерева отказов;
- расчет полной номенклатуры показателей безотказности восстанавливаемых и невозстанавливаемых ТС;
- вероятностный анализ причинно-следственных связей отказов и аварий;
- расчет значимости элементов и их вкладов в общую надежность системы;
- анализ статистических данных по эксплуатации и испытанию ТС;
- создание наглядных отчетов по результатам работы;
- анализ создаваемых моделей на структурную и логическую корректность;
- оперативное взаимодействие с пользователем (предоставление необходимой справочной информации, наличие настраиваемых средств оптимального восприятия информации).

### Общая функциональная структура программного комплекса

Система не является распределенной, поэтому все выполняемые ею функции сосредоточены на одном узле. Приведем описание информационных связей в автоматизированной системе, используя следующие понятия:

**АПК** — рассматриваемый автоматизированный программный комплекс;

**ИТС** — некоторая техническая система, являющаяся объектом исследования в данной ПК (исследуемая ТС);

**Модель** — модель ИТС, создаваемая в данной АПК в виде структурной надежностной схемы или дерева отказов со спецификацией и определенными параметрами и являющаяся корректной с точки зрения ее структуры и логики.

Описание информационных связей:

**Действие** — действие пользователя, выбираемое в процессе работы с программой посредством интерфейса системы. Активирует соответствующую подсистему.

**Конфигурация** — структура данных, представляющих информацию о конфигурации программы.

**Справка, справка по разделам** — информация по работе программы и работе с программой, включающая контекстные справки, описание принципов работы программного комплекса, а также описание работы в каждой подсистеме.

**Данные** — числовой массив, представляющий реальные данные по эксплуатации конкретного элемента ИТС.

**Параметры** — параметры и вид закона распределения, полученные в результате аппроксимации данных.

**Проект** — набор структур данных на программном уровне, описывающих модель и ее характеристики. На визуальном уровне — структурная схема (дерево отказов) ИТС. Проект может быть, как текущим (с которым пользователь работает в данное время), так и загружаемым из ранее сохраненных.

**Готовый проект** — проект, находящийся в стадии готовности для анализа, т. е. проект в момент времени передачи его для проверки и анализа соответствующим подсистемам.

**Результат проверки** — результат проверки проекта в соответствующей функции комплекса, возвращаемый пользователю.

**Модель** — модель ИТС — *готовый проект*, прошедший успешную проверку на корректность и пригодный для вычислений.

**Сценарий** — настраиваемые пользователем параметры проведения вычислений, включающие номенклатуру вычисляемых показателей, настройки создаваемых отчетов и т. д.

**Результаты** — результаты расчетов над моделью, представленные в виде массивов и структур числовых данных, непригодные для адекватной интерпретации их пользователем.

**Отчеты** — показатели надежности: функции готовности, неготовности, интенсивности отказов ИТС, значимости и вклады элементов, ЛКФ и т. д., а также диаграммы и графики перечисленных показателей, составленные в виде отчета.

Назначение и основные характеристики подсистем (с указанием входной и выходной информации).

**1. Подсистема инструментария работы пользователя** выполняет три основные функции.

- **Конфигурирование ПК.** Предоставляет пользователю инструменты для изменения конфигурации ПК.

**Вход:** структура данных, описывающая текущую конфигурацию ПК.

**Выход:** новая структура данных; обновленный внешний файл конфигурации.

- *Информационно-справочная поддержка.* Представляет собой справочную систему, которая может координировать действия пользователя, выдавая контекстную справочную информацию, а также предоставляя доступ ко всей справочной системе сразу.

**Вход:** указатель на раздел справки.

**Выход:** запрашиваемая информация.

- *Работа с проектами.* Создание новых экземпляров дочерних окон по отношению к главному, а также их первичная подготовка для работы (создание графической поверхности, обработчиков базовых событий). Также реализует загрузку существующих проектов (инициализацию структур данных, первичное отображение проекта на графическую поверхность).

**Вход:** значение счетчика открытых дочерних окон (в случае загрузки из файла также имя файла на диске, в котором хранится проект, либо идентификатор нового проекта).

**Выход:** созданная и подготовленная рабочая область (форма) (в случае загрузки из файла: также структуры данных, описывающие открытый проект).

**2. Подсистема моделирования ИТС имеет в своем составе три подсистемы и одну автономную функцию.**

- *Создание спецификации ИТС.* Предоставляет пользователю инструменты для создания спецификации ИТС, представленные текстовым редактором с возможностями форматирования текста и добавления изображений и других объектов. Использует формат RTF (rich text format).

**Вход:** модель ИТС (поле, отвечающее за спецификацию ИТС).

**Выход:** модель ИТС, конкретно: поле, отвечающее за спецификацию ИТС, обновленное новыми значениями; изменения в файле проекта.

**3. Подсистема анализа статистических данных выполняет две функции.**

- *Загрузка данных.* Предоставляет средства для загрузки экспериментальных данных, включающие ручное редактирование, загрузку из текстового файла и загрузку из файлов электронных таблиц Excel (\*.xls, \*.xlsx, \*.xlsm) с использованием технологии COM.

**Вход:** ссылка на область памяти, в которой будет размещен массив значений.

**Выход:** массив числовых значений, представляющих данные об эксплуатации ИТС (значения наработок и восстановлений элементов ИТС).

- *Аппроксимация.* Решение задачи аппроксимации закона распределения на основе типовых распределений.

**Вход:** массив числовых значений.

**Выход:** структура данных, содержащая вид распределения и его параметры.

**4. Подсистема моделирования структурных схем.** Функции подсистемы.

- *Графическое моделирование надежности структуры ИТС.* Предоставляет средства, структуры, события и процедуры, позволяющие отображать структурную схему на рабочем поле и динамически изменять ее.

**Вход:** экземпляр рабочей области, графическая поверхность, проект.

**Выход:** структуры данных, описывающие структурную схему готового проекта;

- *Установка параметров.* Предоставляет средства, структуры, события и процедуры, позволяющие определять и изменять параметры элементов модели структурной схемы, сопряженные с подсистемой анализа статистических данных.

**Вход:** проект или новый проект.

**Выход:** структуры данных, описывающие параметры элементов проекта.

**5. Подсистема моделирования деревьев отказов.** Функции подсистемы.

- *Графическое моделирование деревьев отказов.* Предоставляет редактор, структуры, события и процедуры, позволяющие создавать графическую модель дерева отказов на рабочем поле и динамически изменять ее.

**Вход:** экземпляр рабочей области, графическая поверхность, проект.

**Выход:** структуры данных, описывающие модель дерева отказов готового проекта.

- *Установка параметров.* Предоставляет средства, структуры, события и процедуры, позволяющие определять и изменять параметры элементов модели дерева отказов, сопряженные с подсистемой анализа статистических данных.

**Вход:** проект или новый проект.

**Выход:** структуры данных, описывающие параметры элементов проекта.

**6. Подсистема выполнения проекта.** Выполняет последовательно четыре функции:

- *Структурно-логическая проверка модели.* Осуществляет проверку проекта на наличие логических и других ошибок: завершенности, проверку резервных связей, корректность введенных параметров и т. д.

**Вход:** готовый проект.

**Выход:** модель.

- *Выбор и определение сценариев вычислений.* Позволяет настроить вид отчета с результатами, номенклатуру вычисляемых характеристик и другие параметры моделирования.

**Вход:** модель.

**Выход:** сценарий вычислений (список вычисляемых параметров и метод анализа, определяемый ПК в зависимости от типа модели).

- *Вычисления.* Выполняет расчеты по входной модели.

**Вход:** модель, сценарий вычислений.

**Выход:** массивы и структуры числовых данных, представляющих результаты (количественные оценки надежности — функции готовности,



неготовности, интенсивности отказов, значимости, вклады, ЛКФ, точечные оценки, графики и диаграммы перечисленных параметров).

• **Составление графиков и отчетов.** Предоставляет результаты пользователю в эргономичном виде: графики, диаграммы, таблицы, удобные для интерпретации.

**Вход:** массивы и структуры числовых данных, полученные на выходе *вычислений*.

**Выход:** отчеты формата HTML (эргономично представленные данные, получаемые на входе).

В качестве требований к режимам функционирования можно выделить следующие:

- необходимо наличие в системе интуитивно понятного интерфейса;
- в подсистемах графического моделирования не должно быть ограничений по размерам моделей (числу элементов схем, деревьев), кроме естественных ограничений объемами оперативной памяти;
- необходимо создание обработчиков всех типичных ошибок во всех подсистемах;
- модели должны обладать "открытой архитектурой", обеспечивающей возможность изменения или дополнения;
- необходимо присутствие оперативных подсказок в ситуациях, затрудняющих дальнейшие действия пользователя.

Среди перспектив развития и модернизации автоматизированной системы можно выделить такие, как, например, внедрение Марковского анализа для моделирования.

Схема организационной структуры комплекса представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема организационной структуры комплекса

Работоспособность системы проверялась на различных программных и аппаратных платформах, при работе с операционными системами Windows 10 и Windows 7. Проведенное тестирование позволяет утверждать, что вероятность появления ошибки при работе программы в стандартных ситуациях, довольно мала.

Входными данными для программного комплекса является описание некоторого объекта, представленное в объеме, необходимом для его структурной декомпозиции, определения параметров каждого элемента и понимания логики его функционирования (в том числе правильного выделения критериев отказов и правильное понимание причинно-следственных связей, приводящих к авариям).

Рабочее пространство системы представлено несколькими формами и редакторами, также имеется несколько вариантов отчетов, предоставляемых пользователю.

Главные представления рабочей области программы показаны на рис. 3.

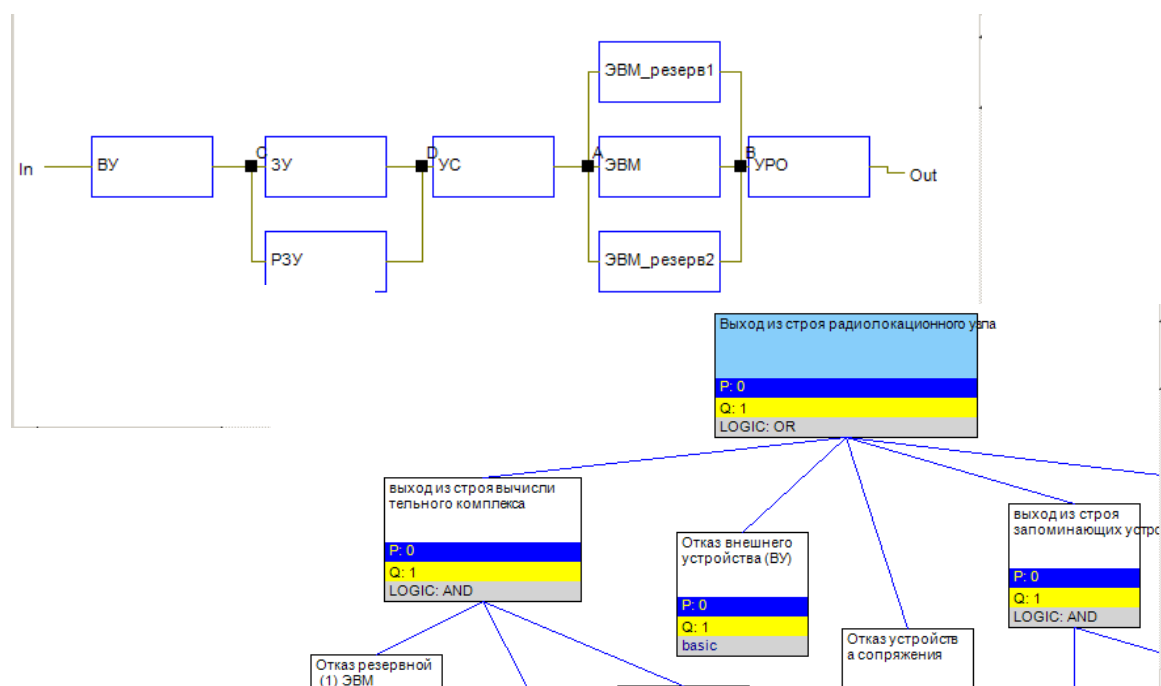


Рис. 3. Основные рабочие области комплекса

Для испытаний комплекса взяли систему, состоящую из технического объекта и системы защиты объекта. В качестве примера такого объекта служит ядерная реакторная установка, реактор которой подлежит останову после прекращения циркуляции теплоносителя по контуру (см. рис. 4).

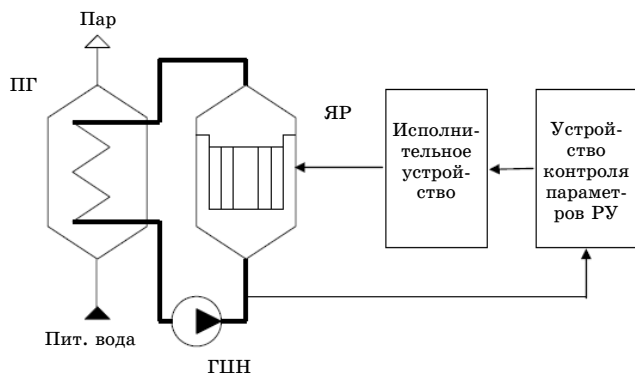


Рис. 4. Схема технического объекта с системой защиты

Данный пример рассматривался во многих аналогичных работах [6, 7]. В блоке управления реактором имеется устройство, контролирующее его параметры (УКП) и выдающее сигнал при нарушении работы системы циркуляции (СЦ) теплоносителя. Дополнительно реактор оснащен исполнительным устройством системы автоматической защиты (ИУСАЗ), которое по сигналу УКП автоматически останавливает реактор без участия оператора.

При анализе не учитывали работоспособность светового индикатора и звукового оповещателя аварии, посчитав их абсолютно надежными. Таким образом, проведя анализ и структурную декомпозицию исследуемой системы с защитой (ИСЗ), выделили 4 основных структурных элемента, образующих в целом схему функциональной целостности ИСЗ. Исходные данные для ИСЗ представлены в таблице.

На рис. 5 показана базовая блок-схема в редакторе комплекса.

Прогноз безотказной работы ИСЗ представлен на графике (рис. 6).

Исходные данные для ИСЗ

Структурный элемент	Распределение отказов (закон, параметры)	Распределение восстановлений (закон, параметры)
Оператор (Оп)	Экспоненциальный ( $\lambda = 0,001$ )	Нормальный ( $\mu = 5$ ; $\delta = 1$ )
Система циркуляции теплоносителя (СЦ)	Экспоненциальный ( $\lambda = 2E-05$ )	Рассматривается без восстановления
Исполнительное устройство системы автоматической защиты (ИУСАЗ)	Экспоненциальный ( $\lambda = 5E-05$ )	Рассматривается без восстановления
Устройство контроля параметров	Экспоненциальный ( $\lambda = 3E-05$ )	Рассматривается без восстановления

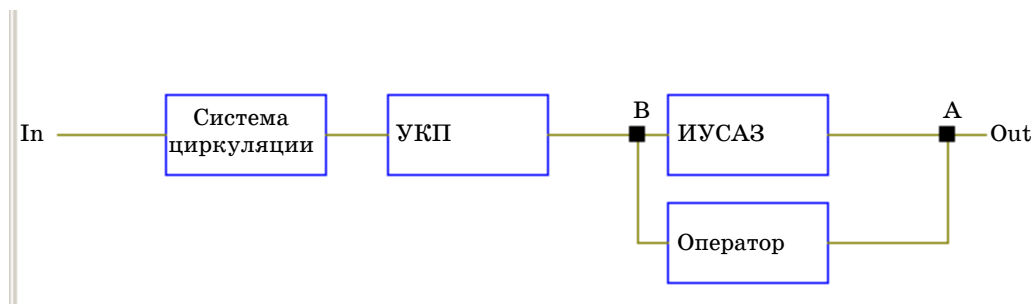


Рис. 5. Структурная блок-схема ИСЗ, набранная в редакторе

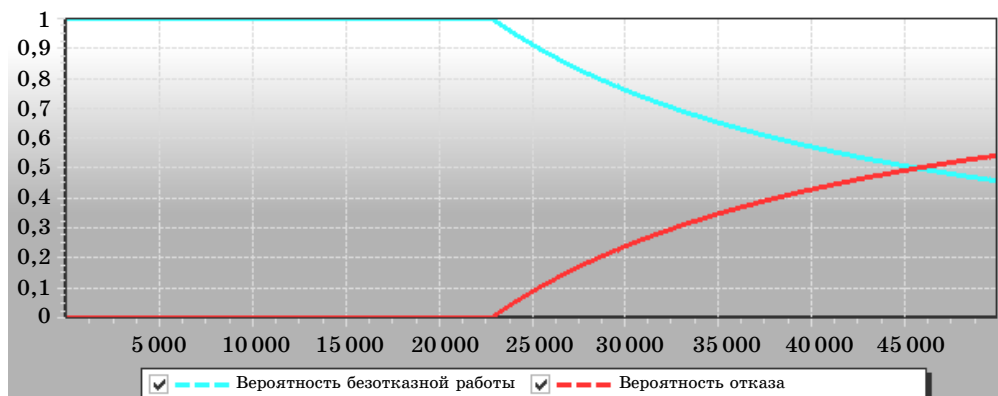


Рис. 6. Прогноз безотказной работы ИСЗ

### Заключение

Разработанная автоматизированная система позволяет осуществлять комплексный анализ надежности технических объектов (ТО) любого назначения на разных этапах их жизненного цикла, включающий:

- прогнозирование безотказности/ремонтно-пригодности ТО;
- прогнозирование безотказности/ремонтно-пригодности каждого элемента ТО;
- генерацию минимальных сечений отказов и кратчайших путей успешного функционирования, составляющих вместе ЛКФ ТО;
- расчет значимостей и вкладов элементов ТО, позволяющий определить, какой элемент является "слабым звеном" в системе, а также, как наиболее эффективно повысить/понизить надежность ТО;
- причинно-следственный анализ отказов (аварий), позволяющий найти наиболее вероятный вариант развития и возникновения аварии, а также поочередно сосредотачиваться на каком-либо одном конкретном отказе ТО.

Для осуществления вышеперечисленных действий программный комплекс оснащен двумя графическими редакторами (для структурных надежностных блок-схем и для деревьев отказов), позволяющими создавать соответствующие модели. В дополнение к этому комплекс имеет модуль анализа статистических данных и последующей аппроксимации закона распределения.

В качестве основных преимуществ программного комплекса можно отметить:

- ориентацию на создание модели исследуемой технической системы двумя способами: в виде структурных блок-схем и в виде деревьев отказов;

- реализацию наиболее гибких технологий моделирования и расчета надежности: структурно-логическое моделирование (с помощью ОЛВМ) и вероятностный анализ ДО;
- поддержку применения широкого спектра законов распределений (7 основных законов, применяемых в теории надежности);
- наличие сопряженного модуля анализа эмпирических данных.

### Литература

1. Фролов Д. Ю. Принципы построения системы классификации информационных сетей по критерию надежности // Транспортное дело России. 2011. — 156 с.
2. Матвеевский В. Р. Надежность технических систем: учеб. пособие. — М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2002. — 113 с.
3. Основные положения общего логико-вероятностного метода анализа систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docplayer.com/27533052-Osnovnye-polozeniya-obshchego-logiko-veroyatnostnogo-metoda-analiza-sistem.html>.
4. Чекрызов С. Проектирование систем контроля и управления технологическими процессами. — Коктла-Ярве, 2007. — 25 с.
5. Сукач Е. И., Демуськов А. Б., Ратобыльская Д. В. Компьютерная система вероятностно-алгебраического моделирования сложных систем со многими состояниями // Математические машины и системы. 2011. С. 32—39.
6. Можаяев А. С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности структурно-сложных систем: учебн. пособие. — Л.: Изд. ВМА им. Н. Г. Кузнецова, 1988. — 68 с.
7. Черкесов Г. Н., Можаяев А. С. Логико-вероятностные методы расчета надежности структурно-сложных систем. Надежность и качество изделий. — М.: Знание, 1991.

## SOFTWARE TOOLS FOR COMPLEX MODELING AND PROBABILISTIC ANALYSIS OF RELIABILITY OF TECHNICAL SYSTEMS

A. O. Butko

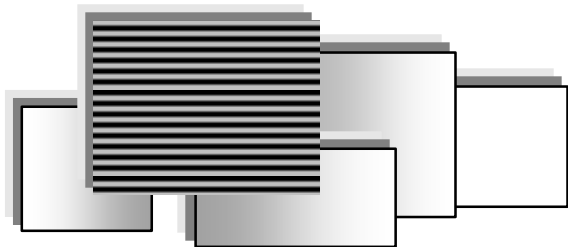
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The features of software development for complex modeling and analysis of reliability and safety of technical systems for various purposes are considered. This task was solved on the basis of different technologies that provide different levels of accuracy and reliability. The main feature of the new solutions is the use of modern development environments and calculation techniques based on various libraries. The complex of the presented modules can be used in any production area that requires increased reliability and safety control in order to minimize failures and accidents.*

**Keywords:** automation, programming, technical systems, engineering calculations, reliability, safety, probabilistic analysis, structural modeling, logical modeling, databases.

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

Статья поступила в редакцию 31 января 2022 г.



## ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

---

УДК 004

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_2\_65

EDN: EKAXYS

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК В ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ УЧЕБНО-ПОЗНАВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Е. А. Рыбальская, канд. эконом. наук

ГБОУ ДПО «Псковский областной институт повышения квалификации  
работников образования», г. Псков, Россия

*Раскрыты элементы и особенности внедрения цифрового образования, взаимосвязь технологической трансформации цифровой образовательной среды с учебно-познавательной деятельностью.*

**Ключевые слова:** цифровые образовательные технологии, цифровые образовательные системы, информационно-технологические цепочки, дистанционное обучение.

Особенностью федеральных государственных образовательных стандартов общего образования является их деятельностный характер, который ставит главной задачей развитие личности ученика. Современное образование отказывается от традиционного представления результатов обучения в виде знаний, умений и навыков; формулировки ФГОС указывают на реальные виды деятельности [1].

Поставленная задача требует перехода к новой системно-деятельностной образовательной парадигме, которая, в свою очередь, связана с принципиальными изменениями деятельности педагога, реализующего новый стандарт. Также изменяются и технологии обучения. Внедрение информационно-коммуникационных технологий открывает значительные возможности расширения образовательных рамок по каждому предмету в образовательном учреждении.

В этих условиях традиционная школа, реализующая классическую модель образования, стала непродуктивной. Перед педагогами возникла проблема — превратить традиционное обучение, направленное на накопление знаний, умений, навыков, в процесс развития личности ребенка.

Уход от традиционного урока через использование в процессе обучения новых технологий позволит устранить однообразие образовательной среды и монотонность учебного процесса, создаст условия для смены видов деятельности обучающихся, позволит реализовать принципы здоровьесбережения. Рекомендуется осуществ-

лять выбор технологии в зависимости от предметного содержания, целей урока, уровня подготовленности обучающихся, возможности удовлетворения их образовательных запросов, возрастной категории обучающихся.

В условиях реализации требований ФГОС образовательными организациями наиболее актуальными становятся технологии [2]: информационно-коммуникационная технология, технология развития критического мышления, проектная технология, технология развивающего обучения, здоровьесберегающие технологии, технология проблемного обучения, игровые технологии, модульная технология, технология мастерских, кейс-технология, технология интегрированного обучения, педагогика сотрудничества, технологии уровневой дифференциации, групповые технологии, традиционные технологии (классно-урочная система).

Цифровая трансформация учебно-познавательного процесса — оптимизация и/или изменение логики образовательного процесса в результате внедрения цифровых технологий на основании анализа современных данных.

Основные принципы целевой модели применения технологических цепочек: принятие оптимальных и оперативных решений по управлению образовательных организаций (с учетом риск-ориентированного образования) на основании цифровых технологий анализа больших данных), взаимосвязь всех информационных цифровых потоков между собой, в том числе на базе облачных технологий.

Реализация модели предусматривает изменение организационно-учебной структуры в соответствии с задачами цифровой трансформации, включая возможный пересмотр выполняемых функций [2].

Применение информационно-коммуникационных технологий способствует достижению основной цели модернизации образования — улучшению качества обучения, обеспечению гармоничного развития личности, ориентирующейся в информационном пространстве, приобщенной к информационно-коммуникационным возможностям технологий и обладающей информационной культурой, а также представить имеющийся опыт и выявить его результативность.

Достижение поставленных целей возможно через реализацию следующих задач [3]: использование информационно-коммуникационных технологий в учебном процессе; формирование у учащихся устойчивого интереса и стремления к самообразованию; формирование и развитие коммуникативных компетенций.

Цифровая трансформация образования — это достижение необходимых образовательных результатов и движение к персонализации образовательного процесса на основе использования цифровых технологий. Цифровая трансформация образования помогает преодолению неравенства, в первую очередь цифрового разрыва. Отечественная современная стратегия цифровой трансформации образования предусматривает [4]:

- развитие цифровой инфраструктуры образования — подключение образовательных организаций к высокоскоростному Интернету, формирование и развитие цифровой инфраструктуры образовательных организаций и цифровой экосистемы образования;
- развитие систем оценивания и аттестации: создание и внедрение цифровых контрольно-измерительных материалов и инструментов для всех видов аттестационных процедур, создание системы, которая интегрирует сбор, хранение и обмен данными об образовательных достижениях и подтвержденных результатах участников образовательного процесса (система "Цифровой профиль компетенций");
- развитие общего доступа к постоянно обновляющимся и расширяющимся цифровым коллекциям учебно-методических материалов, инструментов и сервисов.

Цифровая трансформация образования и применения технологических цепочек информационно-коммуникационных технологий призваны сместить акценты в обучении с освоения способностей в области работы с данными, информацией и знаниями на освоение специфических человеческих способностей к экспертизе и переносу освоенных знаний и умений в новые ситуации.

Дифференцированная организация обучения предполагает, что одно содержание учебной работы, один способ его предъявления, один темп учебной работы используются для специально выделенной группы обучающихся. При индивидуализированной организации обучения разное содержание учебной работы и разные (если необходимо) способы его предъявления (дифференциация), а также различный темп учебной работы используются для разных обучающихся с учетом их индивидуальных особенностей [5].

Применение технологических цепочек в информационно-техническом процессе учебно-познавательной деятельности реализуется через систему цифровой образовательной среды.

Цифровая образовательная среда — это совокупность информационных систем, цифровых устройств, источников, инструментов и сервисов, которые создаются и развиваются для обеспечения работы учебных заведений и решения задач, возникающих в ходе подготовки и осуществления образовательного процесса. Для персонализированной и ориентированной на результат организации обучения нужна "умная" цифровая среда, автоматизирующая управление учебной работой каждого обучаемого. Цифровая образовательная среда поддерживает совместную работу учителей при разработке и рецензировании учебных модулей и планов занятий, при разработке и обновлении нормативов образовательных достижений по блокам и модулям учебной программы и должна [5]:

- поддерживать систематическую совместную работу обучающихся и педагогов;
- помогать формировать и обновлять профиль каждого обучающегося, их личные учебные планы, а также следить за их выполнением и корректировкой;
- предоставлять всем участникам учебного процесса доступ к необходимым (обязательным и дополнительным) учебным и контрольным материалам;
- помогать всем заинтересованным лицам (родителям, администрации образовательной организации, привлекаемым экспертам, проверяющим и др.) отслеживать ход образовательного процесса;
- способствовать непрерывному профессиональному развитию педагогов и их постоянному взаимодействию.

В условиях дистанционного обучения возможно использовать Интернет-сервисы, которые предоставляют уникальные возможности для структурирования и визуализации информации, вместо заданий на конспектирование каких-либо первоисточников, подготовки докладов и рефератов обучающимся можно предложить создание кластеров, ментальных карт, лент времени, инфографики и т. п. (таблица).

Примеры онлайн-сервисов визуализации [3]

Прием визуализации	Примеры онлайн-сервисов	Варианты использования
Кластеры	<a href="https://caco.com/">https://caco.com/</a>	Различные классификации, систематизация. Построение графов, деревьев, родословных
Ментальные карты	<a href="http://popplet.com/">http://popplet.com/</a>	Смысловое чтение текста, сбор и структурированное представление информации, "мозговой штурм"
Инфографика	<a href="https://visual.ly/">https://visual.ly/</a>	Сжатие большого объема информации, обобщение, структурирование и систематизация представляемой информации и т. п.
Ленты времени	<a href="http://www.timetoast.com/">http://www.timetoast.com/</a>	Создание временно-событийных линеек для представления развития эпох, событий, личностей

Применение системы информационно-коммуникационных и цифровых технологий образовании — это способ организации образовательной среды, основанный на современных цифровых технологиях. Таким образом, цифровая трансформация отрасли "Образование" — это процесс обновления планируемых образовательных результатов, содержания образования, методов и организационных форм учебной работы, а также оценивания достигнутых результатов в быстроразвивающейся цифровой среде для кардинального улучшения образовательных результатов каждого обучающегося. В результате происходит достижение "цифровой зрелости", т. е. достижение заданных параметров, отражающих уровень развития информационно-телекоммуникационной инфраструктуры образовательных организаций, цифровых компетенций участников образовательного процесса, уровень доступности образовательных услуг и цифровых сервисов и т. д. Для повышения эффективности, применения системы, ее необходимо разделить на четыре основных этапа [6]:

*1-й этап:* выявление учебного материала, требующего конкретной подачи, анализ образовательной программы, анализ тематического планирования, выбор тем, выбор типа занятия, выявление особенностей материала занятия данного типа;

*2-й этап:* подбор и создание информационных продуктов, подбор готовых образовательных медиаресурсов, создание собственного продукта (презентационного, обучающего, тренирующего или контролирующего);

*3-й этап:* применение информационных продуктов, применение на уроках разных типов, применение в воспитательной работе, применение при руководстве научно-исследовательской деятельностью обучающихся;

*4-й этап:* анализ эффективности использования информационно-коммуникационных технологий, изучение динамики результатов, изучение рейтинга по предмету.

Инструментами для осуществления цифровой трансформации системы образования являются — создание широкого набора цифровых решений для дошкольного, среднего, профессионального

и высшего образования; разработка цифровых платформ онлайн-обучения для обеспечения максимального доступа к образовательным возможностям; формирование "цифрового следа" обучающихся и индивидуальных образовательных траекторий; мониторинг удовлетворенности качеством предоставляемых образовательных услуг обучающихся и их родителей (законных представителей); предоставление образовательным организациям широкополосного доступа в сеть Интернет [7].

Цифровизация образовательного процесса представляет собой обоюдную трансформацию образовательного процесса, формирующегося под современные условия, и современных технических средств, которые внедряются в образовательный процесс.

Цель преобразования образовательного процесса — применение возможностей цифровых технологий с максимальной эффективностью. В свою очередь, целью развития технологий в сфере образования является полная их адаптация и максимально удобное встраивание в процесс обучения для максимально комфортного решения поставленных педагогических задач.

### Литература

1. Мишота И. Ю. Развитие смешанного обучения в условиях цифровизации образовательного процесса // Вестник РГГУ. Сер. "Психология. Педагогика. Образование". 2018. № 3 (13). С. 97—106.
2. Гайсина С. В. Цифровая грамотность и цифровая образовательная среда школы. 2018. — 30 с.
3. Долгова Т. В. Смешанное обучение — инновация XXI века // Интерактивное образование [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://clck.ru/GQXen>.
4. Патаракин Е. Д. Сетевые сообщества и обучение. — М.: ПЕР СЭ, 2006. — 112 с.
5. Рыбальская Е. А. Оптимизация образовательных процессов с использованием информационно — коммуникационных технологий // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 4 (180). С. 54—57.
6. Федеральный закон от 29.12.2010 № 436-ФЗ "О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию". Постановление Правитель-



ства Российской Федерации от 18.04.2016 г. № 317 "О реализации национальной технологической инициативы".

7. Приказ Минобрнауки России № 22 от 20 января 2014 г. "Об утверждении перечней профессий и

специальностей среднего профессионального образования, реализация образовательных программ по которым не допускается с применением исключительно электронного обучения, дистанционных образовательных технологий".

## APPLICATION OF TECHNOLOGICAL CHAINS IN IT PART OF EDUCATIONAL AND COGNITIVE ACTIVITIES

E. A. Rybalskaya

Pskov Regional Teachers-in-Service Institute, PR TISI, Pskov, Russia

*Show parts and unique features of integrating e-learning and connection between technological transformation of education environment and educational and cognitive activities.*

*Keywords:* digital education technologies, digital education systems, information technology chains, remote learning.

---

Рыбальская Елена Александровна, доцент.  
E-mail: lenaryb78@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 1 марта 2022 г.*