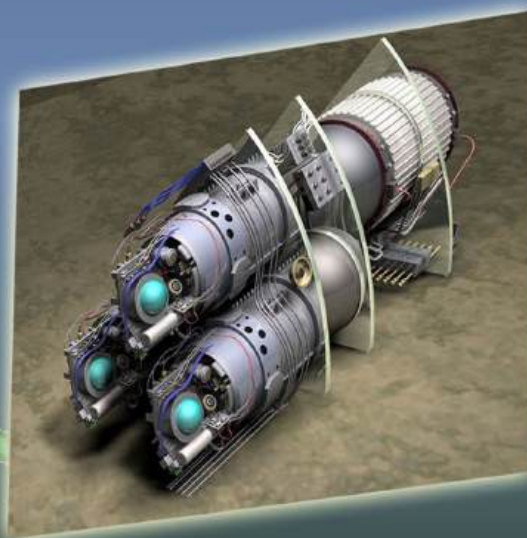
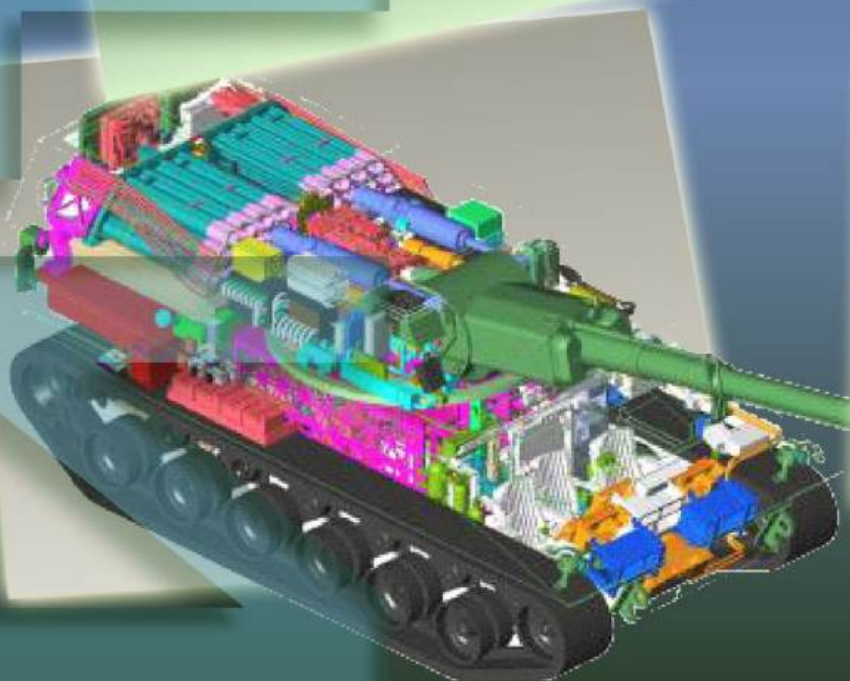
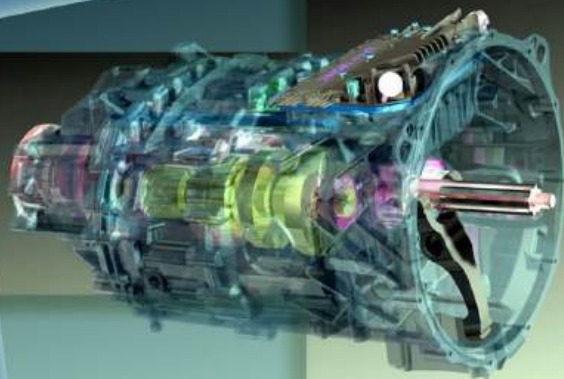
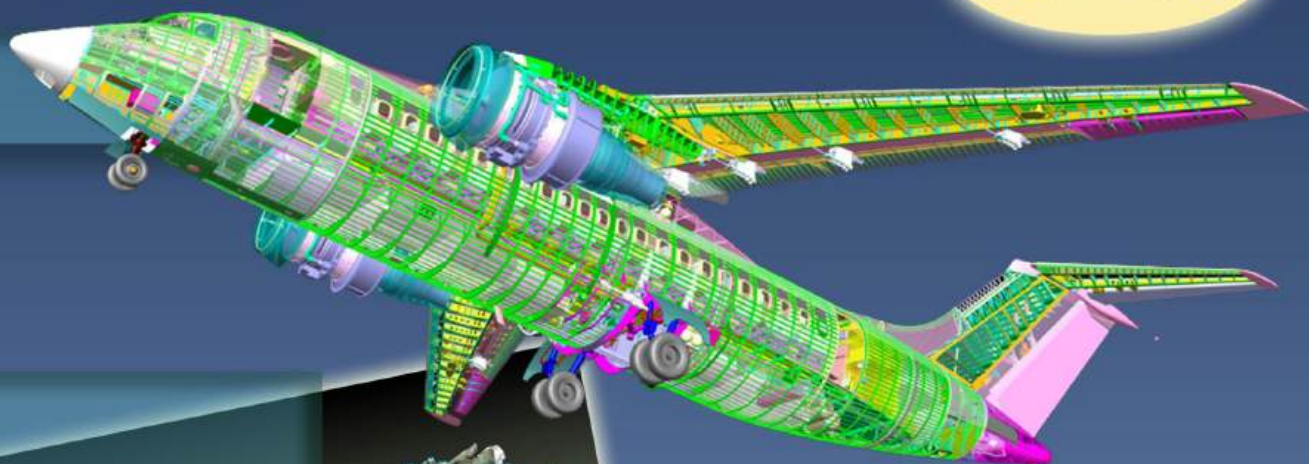


# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 3' 2020





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

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



Межотраслевой научно-технический журнал

**Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **79379**

Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал

**Конструкции из композиционных материалов**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **80089**

Издается с 1981 года



Научно-технический журнал

**Информационные технологии в проектировании и производстве**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **79378**

Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал

**Экология промышленного производства**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **80090**

Издается с 1993 года



Научно-практический журнал

**Вопросы защиты информации**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **79187**

Издается с 1974 года

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

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

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

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);

факс: 8 (495) 491-44-80.

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



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

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

## № 3 (179) 2020

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1976 г.

### Главный редактор

И. А. Шеремет, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по научной работе

### Заместитель главного редактора

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

### Ответственный секретарь

Г. П. Глотова, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

### Редакционная коллегия:

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

☎ 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», 2020.  
№ 3 (179). С. 1—76.

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

Подписано в печать 28.08.2020.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 8,8. Уч.-изд. л. 9,1.  
Заказ 1954. Тираж 250 экз.  
Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».  
Отпечатано в ООО «Рапидограф».  
117342, Москва, ул. Бултерова, д. 17Б.  
Индекс 79378. 11 статей.

Статьи рецензируются.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

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

- Бутко А. О., Каленова Н. В. Особенности организации много-  
итерационных инженерных расчетов в системах комплексного мо-  
делирования..... 3
- Сумароков С. В., Арутюнян А. Р., Гусев М. В., Кечков А. А., Но-  
восельский Ф. О. Практическая реализация методов «прямого» мо-  
делирования для нейтронно-физических расчетных кодов..... 9
- Кондусова В. Б., Кондусов Д. В., Сергеев А. И., Сердюк А. И.  
КЖЦ-решения как инструмент информационной поддержки проек-  
тирования, производства и эксплуатации наукоемких изделий..... 16
- Правильщиков П. А. Законы сохранения в информатике ..... 20
- Шевчук О. А., Конопацкий Е. В. Решение дифференциальных  
уравнений с помощью геометрических интерполянтов..... 29
- Федоров С. В. Разработка и моделирование универсального ал-  
горитма функционирования устройства формирования переключа-  
ющих функций системы управления преобразователем частоты на  
основе прямого преобразования сигнала ..... 34
- Васина Н. С., Машкин М. Н., Романов О. Т., Волков А. Ю. Задача  
распределения радиолокационных ресурсов для подсистемы орга-  
низации поиска целей автоматизированной системы обработки ин-  
формации и управления радиолокационными станциями..... 38

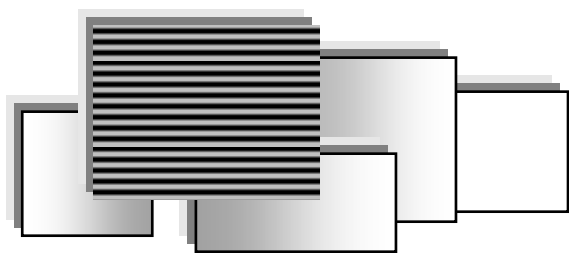
### Информационные технологии решения задач производства

- Журавлева Л. В., Кирилин В. Д., Репников П. О., Усюкин М. А.  
Анализ интеграции технологии "фабрик будущего" и "Индус-  
трия 4.0" ..... 45
- Резникова Е. В., Сафаров М. А. Методика применения причинно-  
следственного анализа и принципов разрешения технических про-  
тиворечий при разработке средств пульсоксиметрии ..... 52
- Старостин Н. П., Тихонов Р. С., Шишигина А. С. Управление  
тепловым процессом соединения полиэтиленовых труб с помощью  
электросварного перехода при низких температурах ..... 60
- Шубин Р. В. Модели структуры процессов автоматизации дея-  
тельности научно-производственной организации ..... 66

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

## **THE SCIENTIFIC JOURNAL**

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



## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 681.518.2

### ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ МНОГОИТЕРАЦИОННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ В СИСТЕМАХ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. О. Бутко, канд. техн. наук; Н. В. Каленова, канд. физ.-мат. наук  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

*Предложена схема проведения многоитерационных расчетов в комплексной среде параметрического моделирования с использованием вспомогательных программных средств, позволяющих построить в рамках задач проектирования единую среду и элементы системы подготовки производства на базе создаваемых электронных конструкторско-технологических решений. В основу схемы положена информационная модель, разрабатываемая в инвариантной лингвистической среде моделирования. Решение может быть использовано в любой задаче, которая требует моделирования и оптимизации процессов подготовки производства технических изделий.*

**Ключевые слова:** управление проектами, автоматизация, программирование, итерационные процессы, инженерные расчеты, преобразование данных, моделирование, структурное моделирование, параметрическое моделирование.

Комплексные модели различных технических изделий зачастую сопровождают комплексом достаточно сложных инженерных расчетов, которые в некоторых случаях требуют многократного пересчета с целью определить оптимальные характеристики конечного изделия. Такие расчеты можно проводить как непосредственно внутри модели с помощью собственного математического аппарата и систем параметризации систем автоматизированного проектирования (САПР), так и отдельно во внешних расчетных системах, ориентированных в первую очередь на такие вычисления. Основной проблемой зачастую является оперативное проведение повторных расчетов с новыми исходными данными. Обычно это требует дополнительных временных затрат, особенно в случае, когда требуются десятки и сотни итераций. Предлагается использовать средства автоматизированного пересчета модели на основе модуля анализа и обработки моделей ACSMM. В качестве рабочих САПР взяты разработанный в МАИ комплекс структурно-параметрического моделирования (ПК СПМ) и Siemens NX.

Рассмотрим несколько примеров моделирования технических изделий в современных САПР с реализацией многоитерационных расче-

тов и представлением их результатов в виде графиков и диаграмм [1].

На рис. 1 показан общий вид СПМ сборки втулки несущего винта вертолета и приведены основные характеристики, на основе которых реализована параметризация компонента модели — вилки (элемент vilka900, показан стрелкой): расстояние между отверстиями крепления лопасти ( $L_{otv}$ ) и длина вилки ( $L_h$ ).

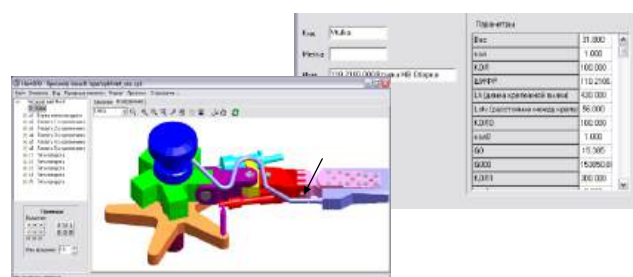


Рис. 1. Общий вид и параметры модели втулки несущего винта

В зависимости от длины лопасти меняются длина вилки и расстояние между крепежными отверстиями. В результате изменяются вес, объем, площадь поверхности, а соответственно, и трудоемкость обработки изделия и сборки узла.

На рис. 2 показаны структура модели вилки и схема передачи параметров между элементами.

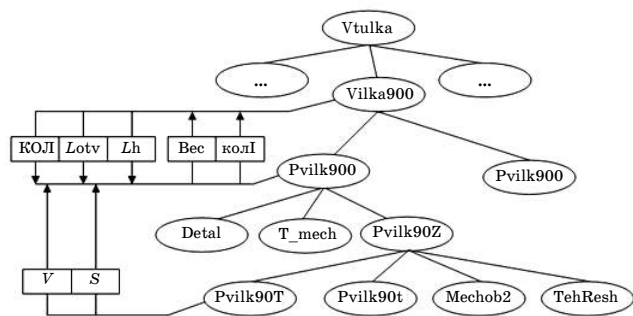


Рис. 2. Схема модели втулки (фрагмент — элемент "вилка")

Параметризация модели включает следующие компоненты:

1. Изменение конфигурации на основе функциональных расчетов;
2. Варьирование спецификации;
3. Параметризация технологической модели изделия на основе маршрутов, производственных ресурсов;
4. Расчет функциональных и геометрических характеристик;
5. Определение схемы сборки.

Производят следующие расчеты:

- количества деталей в сборке:

$$\text{КОЛ}_1 = \text{КОЛ} \times \text{кол\_изд}, \quad (1)$$

где КОЛ — количество узлов (используют для расчета трудоемкости сборки заданного количества узлов);

кол\_изд — количество деталей на узел;

- веса детали:

$$\text{Вес}_{\text{дет}} = V p, \quad (2)$$

где  $p$  — плотность материала, из которого изготовлена деталь;

$V$  — объем детали, вычисляемый для модели вилки по эмпирической формуле

$$V = f(\text{Lotv}, \text{Lh}, H_1, \dots, H_n), \quad (3)$$

где Lotv — расстояние между отверстиями крепления лопасти;

Lh — длина вилки;

$H_1, \dots, H_n$  — геометрические параметры детали;

- веса узла:

$$\text{Вес}_{\text{узел}} = \text{кол\_изд} \sum_{i=1}^n G_i, \quad (4)$$

где кол\_изд — количество узлов в сборке;

$G_i$  — вес деталей, входящих в узел;

$n$  — количество деталей в узле (вес вычисляют в СПМ или извлекают из внешних источников, например моделей, созданных в различных САПР);

- суммарной площади поверхности для обработки:

$$S_{\text{пов}} = \text{SUM}('Sok', 0, 'd'), \quad (5)$$

где Sok — площадь поверхности одной детали;

- суммарной трудоемкости обработки элементов узла:

$$T := \text{SUM}('T_{\text{шт}}', 0, 'a'), \quad (6)$$

где  $T_{\text{шт}}$  — трудоемкость обработки детали.

В выражениях (5) и (6) 0 — уровень иерархии суммирования (0 — все дерево, остальные значения — уровень подструктуры); "d", "a" — учет неопределенности параметра ("d" — учитывать, "a" — игнорировать).

Выражения (5) и (6) эквивалентны следующим:

$$T = \sum_{i=1}^n T_{\text{шт}i}; \quad S_{\text{нов}} = \sum_{i=1}^n Sok_i.$$

Технологическое проектирование процесса сборки втулки проводили с помощью модуля *PR TECH*, входящего в состав ПМК СПМ.

При проектировании для разных значений параметров Lotv и Lh, получены следующие результаты:

- при Lotv = 56, Lh = 430 значение длительности проекта DUR = 212,79 ч;
- при Lotv = 94, Lh = 560 значение длительности проекта DUR = 216,81 ч.

На основе модели втулки с помощью модуля обмена данными провели экспериментальную отработку методики формирования проекта в Microsoft Project, по результатам которой сделаны выводы об эффективности алгоритмов интерфейса.

Сформированный на основе исходных данных проект представляет собой предварительный план сборки и обработки деталей изделия "втулка" в двух конфигурациях, в состав которого входят основные компоненты узла. Проект содержит информацию о ресурсах (материалы, исполнители заданных работ — цеха), стоимости каждой работы, ее продолжительности, времени начала и окончания, список работ, которые должны быть выполнены перед началом данной работы (предшественники). Фактически проект представляет укрупненный технологический процесс изготовления изделия-аналога. Пользователь имеет возможность назначить бюджет для каждой работы и оценить реальную стоимость проекта, а также распределить работы между исполнителями оптимальным образом. В основном проект представлен диаграммой Ганта. Кроме того, есть отдельные таблицы по ресурсам, стоимости работ, загруженности исполнителей. В проекте отображен критический путь.

Для всех задач, указанных в проекте, ресурсы задавали с помощью макроса загрузки ре-

сурсов. Таким же образом сформирован общий список ресурсов для всего проекта. В процессе назначения введена информация о ресурсе (тип, стоимость, единицы измерения, максимальное значение). Проведена установка формы оплаты (за единицу ресурса или за единицу времени использования ресурса).

По таблице ресурсов можно оценить загруженность исполнителей для перераспределения работ между исполнителями в целях оптимизации процесса и исключения перегрузки производственных мощностей. В случае наличия перегрузки на графике использования ресурсов появится область, заполненная красным цветом, и будет видно, на сколько процентов трудовой ресурс перегружен.

В сформированном проекте после предварительного распределения ресурсов возникла перегрузка, которая была обозначена выделением красным цветом перегруженных ресурсов.

Перегрузка ресурсов также обозначена в таблице использования ресурсов. Для устранения перегрузки можно установить время неурочной работы цехов (в нерабочее время) по дополнительному повышенному тарифу. Также перегрузка может быть устранена добавлением новых производственных мощностей или перераспределением работ между уже задействованными ресурсами.

Выявленная перегрузка была устранена двумя способами: введением дополнительных цехов той же специализации и автоматическим перераспределением ресурсов.

Фрагменты проектов, включающих работы по обработке деталей и сборке втулки, в Microsoft Project показаны на рис. 3, где приведены состояния конструкторско-технологического решения (КТР) для двух конфигураций изделия.

По результатам оценки сформированного проекта и сравнения его содержания с исходными данными в структурно-параметрической модели втулки несущего винта сделано заключение о сохранении целостности информации и корректности передачи ресурсов. Проведена проверка организации связей задач в проекте путем сопоставления их со связями элементов, описанными в модели втулки несущего винта, и установлена их идентичность, что говорит об их успешном преобразовании и назначении.

Анализ КТР выполняли в целях определения степени влияния на длительность и стоимость изделия двух групп характеристик:

- изменение производственных мощностей (введение дополнительных участков для отдельных работ — для сборки узла);

- уровень оснащенности производства СТО.

Соответствующие параметры анализа установлены в модуле ACSMM (рис. 4).

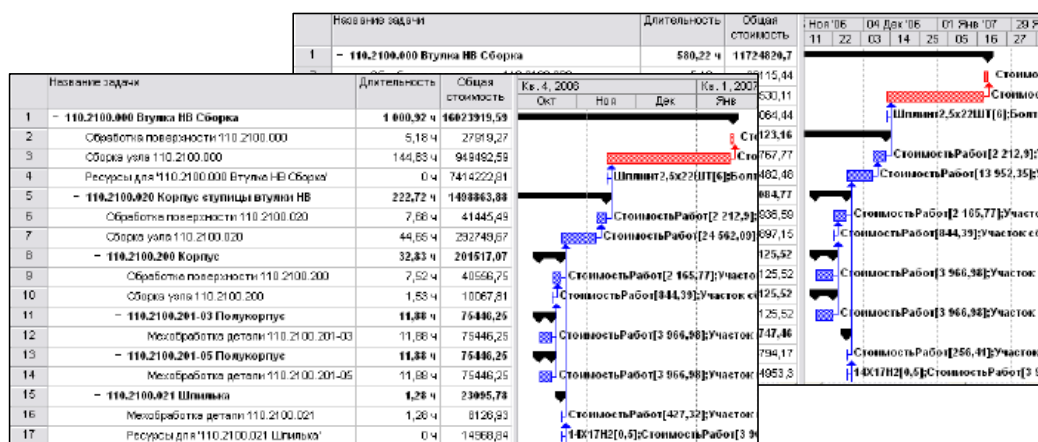


Рис. 3. Фрагменты диаграмм Ганта для втулки (две конфигурации)

**Варьируемые параметры**

Элемент	Метка	Индекс	Параметр	Начальное значение	Количество шагов	Шаг
				3		
				5		

**Контролируемые параметры**

Элемент	Метка	Индекс	Параметр
	г	3	Дл5
	г	3	Ст5
	г	3	Дл3
	г	3	Ст3

Рис. 4. Варьируемые и контролируемые параметры для модели втулки

На полученных в результате анализа графиках (рис. 5) отражена зависимость длительности "Дл" (в днях) и стоимости "Ст" (в единицах стоимости) проекта от количества участков сборки "КУч" (в единицах) для одной из конфигураций изделия.

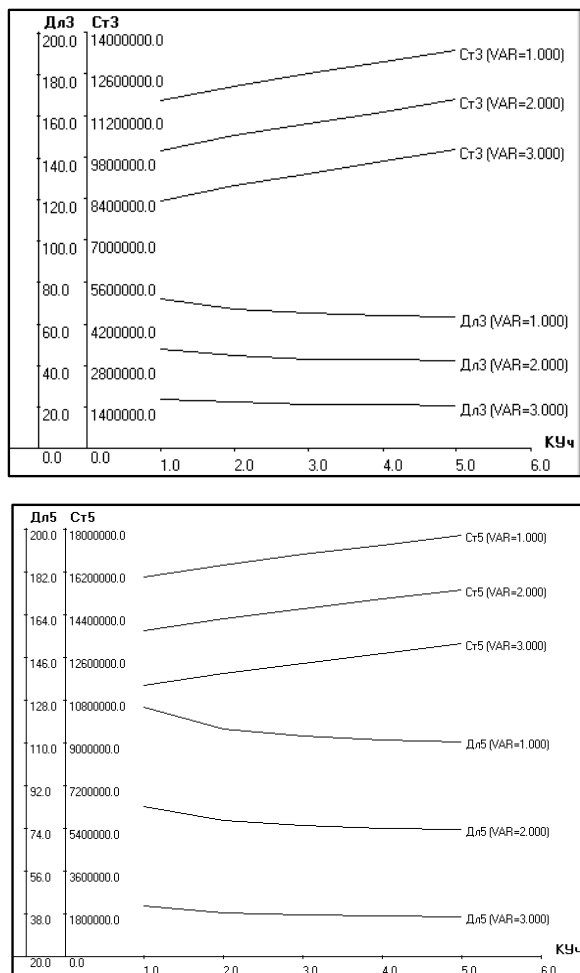


Рис. 5. Оценка влияния вариантов решения (для пяти лопастей)

В КТР включены технологические маршруты изготовления деталей с вариантами реализации заготовительных работ: вариант *а* (VAR = 1) — механическая обработка без предварительного формообразования; вариант *б* (VAR = 2) — предварительное формообразование ковкой; вариант *в* (VAR = 3) — предварительное формообразование штамповкой.

В результате анализа установлено:

- увеличение количества участков сборки приводит к сокращению длительности работ на 5—10 %;
- изменение оснащенности производства СТО (переход со схемы *а* на схему *в*) позволяет сократить стоимость втулки на 15—20 % при заданной программе выпуска 100 шт.

На основе созданной модели втулки решена задача предварительного планирования процес-

сов подготовки и изготовления объекта. Исходные данные для формирования проекта получали на основе сопоставления элементов структуры объекта с изделиями-прототипами. Результаты анализа КТР в среде управления проектами могут быть использованы для их оценки и оптимизации, что обеспечит повышение эффективности процессов подготовки производства.

В следующем примере показано проведение анализа параметризованной модели камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) (рис. 6), созданной в системе NX, в целях установления степени зависимости нагрузок на стенки в рабочей области от функциональных и геометрических характеристик двигателя.



Рис. 6. Основные элементы сборки — внешний и внутренний контуры

Реализованный в модели расчет [2—4] (методика описана далее) воспроизводит приведенную зависимость для указанных исходных данных (введены в модель в виде параметров-констант). Анализ выполняли для различных значений параметров  $P_k$  и  $P_a$ .

Приведенный расчет в полной мере реализован в модели сборки ЖРД (рис. 7) с помощью средств и функций системы параметризации САПР NX. Ввод выражений, констант и формул осуществляли с использованием инструмента (редактора выражений) Expression. Для получения результатов из NX использовали программный модуль обмена данными.

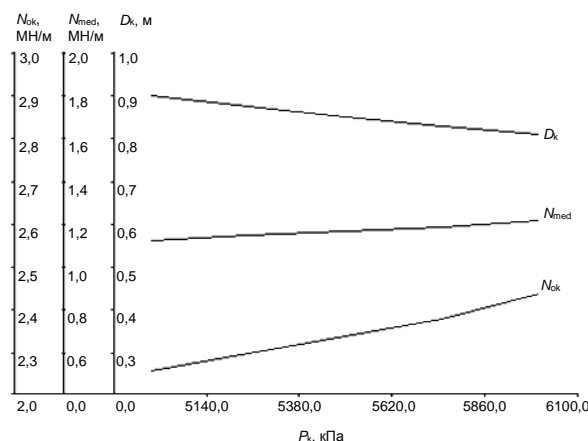


Рис. 7. Представление результатов расчета



Согласно описанной методике в качестве варьируемого параметра выбрано давление в камере двигателя  $P_k$ . Вычислены нагрузки в камере  $N_{med}$  в медианальном направлении и  $N_{ok}$  в окружном направлении и диаметр камеры  $D_k$ .

Для заданного диапазона входных характеристик получены следующие результаты расчета.

При  $P_k = 5000,0$  кПа:  $D_k = 0,901$  м;  $N_{med} = 1,130$  МН/м;  $N_{ok} = 2,260$  МН/м.

При  $P_k = 5250,0$  кПа:  $D_k = 0,876$  м;  $N_{med} = 1,150$  МН/м;  $N_{ok} = 2,300$  МН/м.

В качестве последнего примера проведения расчетов выбрана созданная ранее модель колонки системы заправки (СЗ). Она воспроизводит наиболее важные геометрические, технические и структурные характеристики СЗ, и в нее интегрирован функциональный расчет процесса наполнения рабочей и резервной емкостей, а также емкости хранения компонент горючего из различных средств заправки. Расчет реализован на базе существующей методики, которая позволяет вычислять значения ключевых геометрических параметров емкостей системы и ряда основных функциональных характеристик (геометрический объем, время наполнения емкости в различных рабочих режимах, производительность всей системы наполнения емкостей, изменение давления в баках, необходимое количе-

ство средств доставки (передвижных цистерн) для одновременного заполнения емкостей системы заправки).

На рис. 8 показаны модель емкости и фрагмент расчета в СПМ.

В качестве варьируемых геометрических параметров взяты величина длины обечайки LO и ее диаметр DK, а в качестве контролируемых параметров — время заполнения одной, двух и трех емкостей ( $tB$ ,  $tBB$ ,  $tBBA$ ), производительность заполнения емкостей А, Б и В (QA, QB, QV), повышение давления (PVB, PBA), количество  $n$  агрегатов ЖАЦ-44, необходимых для полной заливки емкостей системы.

Результаты расчета сохранены в файл result.res. По результатам расчета построена зависимость величин  $n$ ,  $tB$  и  $tBB$  от LO и DK. При этом в качестве фиксируемого параметра (значение этого параметра фиксируют при переборе значений второго параметра, затем перебор повторяют для следующего значения этого параметра) выбран базовый диаметр  $D_k$ .

На следующем этапе работы выполнено формирование проекта в Microsoft Project по схеме, представленной на рис. 9. На последней стадии процесса использован специальный макрос для загрузки ресурсов, подключенный к Microsoft Project.

**ФОРМУЛЫ**

**1 Расчет объема емкости**  
 $V_{об} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / 4$   
 $V_{об} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / 4$   
 $V_{об} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / 4$

**2 Объем емкости (куб. м)**  
 $V_{об} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / 4$

**3 Расчет времени заполнения емкости В**  
 $tB = V_{об} / Q_B$   
 $tB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B)$   
 $tB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B)$

**4 Производительность заполнения емкости В**  
 $Q_B = V_{об} / tB$   
 $Q_B = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB)$   
 $Q_B = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB)$

**5 Время заполнения емкости В (мин.)**  
 $tB_{min} = tB / 60$   
 $tB_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B \cdot 60)$   
 $tB_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B \cdot 60)$

**6 Определение производительности заполнения емкости В**  
 $PVB = Q_B / tB$   
 $PVB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB^2)$   
 $PVB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB^2)$

**7 Повышение давления в емкости В**  
 $PVB = V_{об} / tB$   
 $PVB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB)$   
 $PVB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB)$

**8 Расчет времени заполнения емкости Б**  
 $tB = V_{об} / Q_B$   
 $tB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B)$   
 $tB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B)$

**9 Производительность заполнения емкости Б**  
 $Q_B = V_{об} / tB$   
 $Q_B = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB)$   
 $Q_B = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB)$

**10 Время заполнения емкости Б (мин.)**  
 $tB_{min} = tB / 60$   
 $tB_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B \cdot 60)$   
 $tB_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B \cdot 60)$

**11 Определение производительности заполнения емкости Б**  
 $PVB = Q_B / tB$   
 $PVB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB^2)$   
 $PVB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB^2)$

**12 Повышение давления в емкости Б**  
 $PVB = V_{об} / tB$   
 $PVB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB)$   
 $PVB = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tB)$

**13 Расчет времени заполнения емкости А**  
 $tA = V_{об} / Q_A$   
 $tA = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_A)$   
 $tA = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_A)$

**14 Производительность заполнения емкости А**  
 $Q_A = V_{об} / tA$   
 $Q_A = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tA)$   
 $Q_A = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot tA)$

**15 Время заполнения емкости А (мин.)**  
 $tA_{min} = tA / 60$   
 $tA_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_A \cdot 60)$   
 $tA_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_A \cdot 60)$

**16 Расчет времени заполнения емкостей Б и В (мин.)**  
 $tB_{min} = tB / 60$   
 $tB_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B \cdot 60)$   
 $tB_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B \cdot 60)$

**17 Расчет времени заполнения емкостей В, Б и А (мин.)**  
 $tB_{min} = tB / 60$   
 $tB_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B \cdot 60)$   
 $tB_{min} = 3,1416 \cdot D_k^2 \cdot L_{об} / (4 \cdot Q_B \cdot 60)$

**18 Расчет количества агрегатов ЖАЦ для одновременного заполнения емкостей Б, В и А (шт.)**  
 $n = (tB_{min} + tB_{min} + tB_{min}) / t_{ж}$   
 $n = (tB_{min} + tB_{min} + tB_{min}) / t_{ж}$   
 $n = (tB_{min} + tB_{min} + tB_{min}) / t_{ж}$

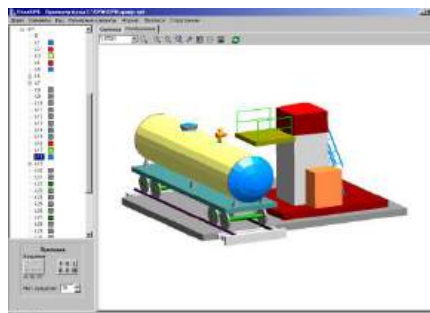


Рис. 8. Емкость заправочной колонки и модель расчета

Имя	Длительность	Ресурсы	Стоимость	Планирование
1. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
2. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
3. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
4. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
5. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
6. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
7. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
8. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
9. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
10. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
11. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
12. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
13. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
14. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
15. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
16. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
17. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
18. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
19. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
20. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
21. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
22. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
23. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
24. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
25. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
26. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
27. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
28. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
29. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
30. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
31. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
32. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
33. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
34. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
35. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
36. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
37. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
38. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
39. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
40. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
41. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
42. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
43. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
44. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
45. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
46. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
47. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
48. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
49. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
50. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
51. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
52. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
53. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
54. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
55. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
56. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
57. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
58. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
59. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
60. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
61. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
62. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
63. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
64. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
65. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
66. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
67. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
68. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
69. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
70. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
71. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
72. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
73. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
74. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
75. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
76. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
77. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
78. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
79. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
80. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
81. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
82. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
83. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
84. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
85. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
86. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
87. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
88. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
89. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
90. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
91. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
92. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
93. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
94. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
95. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
96. Подготовка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
97. Разработка проекта	2 д 0 ч 0 мин	2 шт.	20000 руб.	2 д 0 ч 0 мин
98. Проверка проекта	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
99. Подготовка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин
100. Проверка документации	1 д 0 ч 0 мин	1 шт.	10000 руб.	1 д 0 ч 0 мин

Рис. 9. Представление результатов в Microsoft Project

В итоге на последнем этапе с помощью функций модуля ACSMM построены графики, отражающие исследуемую зависимость (рис. 10).

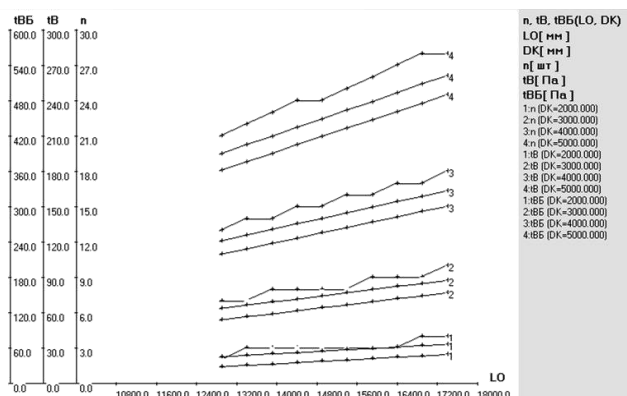


Рис. 10. Представление результатов расчетов

Разработка модуля управления анализом СПМ (ACSMM) позволила построить автоматизированную систему анализа КТР, включающую интегрированный комплекс на основе NX, ПМК СПМ, Microsoft Project и модуля обмена. Это дало возможность реализовать предложенную схему проведения расчетов, с помощью которой обеспечиваются исследование КТР (определение изменений развития) и формирование отчетов в виде графиков и диаграмм. Использование данной схемы способствует обеспечению рационального выбора КТР при подготовке производства сложных технических изделий, что, в свою очередь, повышает эффективность ее процессов.

## Заключение

Показано, что применение разработанной методики автоматизации итерационных расчетов обеспечивает:

- сокращение длительности и трудоемкости процессов подготовки производства за счет автоматизации процесса построения и анализа КТР;
- обоснованность выбора КТР за счет моделирования производственных процессов реализации решений и предоставления возможности анализа изменений в развитии производственных процессов, что способствует повышению эффективности производства и отвечает конечным целям работы.

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

## Литература

1. Цырков А. В. Методология проектирования в мультиплексной информационной среде. — М.: ВИМИ, 1998. — 281 с.
2. Жимоховин В. Г. Расчет камеры жидкостного ракетного двигателя. — М., 1987. — 22 с.
3. Жимоховин В. Г., Ярославцев Н. Л. Расчет основных параметров ТНА и ГГ. — М., 1997. — 11 с.
4. Козлов А. А., Новиков В. Н., Соловьев Е. В. Системы питания и управления ЖРДУ. — М.: Машиностроение, 1988. — 352 с.

## SPECIFICS OF THE ORGANIZATION OF MULTI-ITERATION ENGINEERING CALCULATIONS IN COMPLEX MODELING SYSTEMS

A. O. Butko, N. V. Kalenova

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

*We propose a scheme for performing multi-iteration calculations in a complex environment of parametric modeling using auxiliary software tools that make it possible to construct a unified environment and elements of a production preparation system based on electronic design and technological solutions as part of the design tasks. The scheme is based on an information model developed in an invariant linguistic modeling environment. The solution can be used in any task that requires modeling and optimization of processes for preparing the production of technical products.*

**Keywords:** project management, automation, programming, iterative processes, engineering calculations, data transformation, modeling, structural modeling, parametric modeling.

Бутко Антон Олегович, доцент.

E-mail: mati-tias@yandex.ru

Каленова Наталья Валерьевна, доцент.

E-mail: perepljuika@bk.ru

Статья поступила в редакцию 10 марта 2020 г.

УДК 004.4

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ "ПРЯМОГО" МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ

С. В. Сумароков; А. Р. Арутюнян, канд. техн. наук; М. В. Гусев; А. А. Кечков;  
Ф. О. Новосельский, канд. эконом. наук

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

*Представлено описание использования методов "прямого" моделирования при выполнении расчетных обоснований интегральным расчетным кодом СОКРАТ-БН/В2 и построения расчетной модели на основании существующих моделей нейтронно-физического кода JAR-FR.*

**Ключевые слова:** расчетный код, нейтронно-физический код, расчетные обоснования, расчетная модель, СОКРАТ-БН.

Методы "прямого" моделирования предназначены для обеспечения технологии сквозного проектирования и использования исходных моделей, в первую очередь САД-моделей, на различных этапах конструкторско-технологической подготовки производства. На основе единой конструкторской модели на различных этапах разрабатывают цепочку дополнительных моделей и производят их обработку: разрабатывают расчетные модели и производят расчеты для обоснования рабочих характеристик и безопасности эксплуатации; разрабатывают САМ-модели и управляющие программы для станков с ЧПУ; разрабатываются необходимые технологические модели и модели оснастки. Данный подход должен обеспечивать как снижение трудоемкости и ошибок при подготовке дополнительных моделей, так и повышение точности моделирования, прослеживаемости и актуальности моделей.

Частным случаем применения технологий сквозного проектирования является использование САД-моделей при подготовке расчетных моделей для проведения расчетных обоснований. Однако сфера применения методов "прямого" моделирования не ограничена передачей моделей только из САД-систем.

На предприятиях атомной отрасли используют большое количество расчетных кодов: коммерческие, проектные и отраслевые коды, коды собственной разработки. Нарботан большой пул проведенных расчетов, разработано большое количество расчетных моделей для них. При этом зачастую возникает необходимость проведения исследований с использованием различных кодов для единой расчетной модели изделия. Для этих целей расчетчикам приходится на основе существующей расчетной модели "вручную" разрабатывать модель для другого кода. Как следствие имеют место большие трудовые затраты, возможные ошибки преобразования, временные издержки, долгая процедура отладки модели.

Для решения описанных проблем и обеспечения эффективного использования существующих расчетных моделей необходимо обеспечить автоматическую конвертацию моделей,

подготовленных для одного кода, в расчетные модели другого. Это позволит повысить степень доверия к расчетным моделям при проведении обоснований конструкции различными расчетными кодами.

Для проектируемых и эксплуатируемых в РФ быстрых натриевых реакторов поставлена задача обеспечить их эффективность и конкурентоспособность. Решение данной задачи идет по нескольким направлениям, одним из которых является совершенствование конструкции активной зоны, направленное на снижение потребления реактором ядерного топлива. Это планируют обеспечить за счет применения новых конструкционных материалов, позволяющих достичь более глубокого уровня выгорания топлива и реализации замкнутого ядерного топливного цикла.

Для повышения эффективности эксплуатируемых реакторов БН-600 и БН-800 в запланирована модернизация активной зоны в части увеличения выгорания топлива за счет перехода на более радиационно-стойкий материал оболочек твэлов из улучшенной стали аустенитного класса [1—4]. Кроме того, продолжаются работы по обеспечению реактора БН-800 полной загрузкой смешанным оксидным уран-плутониевым топливом и вовлечению в его топливный цикл низкофонового плутония [5—7]. Повышения эффективности проектируемого реактора БН-1200 планируют достичь за счет внедрения технологии замкнутого ядерного топливного цикла с вовлечением в него плутония, наработанного в реакторах ВВЭР, и плутония собственной наработки, а также перехода на еще более радиационно-стойкий материал оболочек твэлов из улучшенной ферритно-мартенситной стали [8, 9].

Согласно требованиям нормативной документации работы по модернизации или проектированию активных зон сопровождаются анализом их основных технических характеристик и анализом выполнения критериев безопасности [10]. С этой целью проводят большое количество расчетных исследований. Для реакторов БН-600, БН-800 и БН-1200 проектные расчеты основных нейтронно-физических характеристик активных

зон выполняют с использованием кода JAR-FR, а расчеты по анализу безопасности проводят с использованием кода СОКРАТ-БН, который развивается в рамках проекта "Коды нового поколения" [11]. Для выполнения расчетов тяжелых аварий с использованием кода СОКРАТ-БН требуется пространственная нейтронно-физическая модель активной зоны, которая может быть разработана на базе расчетной модели, используемой в коде JAR-FR. Для оптимизации этого процесса целесообразно применение методов "прямого" моделирования, а именно разработку конвертера расчетной модели активной зоны из кода JAR-FR в код СОКРАТ-БН в части его нейтронно-физического модуля SYNTEZ.

Расчетный код JAR-FR (разработан в НИЦ "Курчатовский институт") широко используют в АО "ОКБМ Африкантов" в проектных разработках реакторов БН [3] для анализа инновационных проектов быстрых реакторов. Программа обеспечивает расчет нейтронно-физических характеристик реактора в многогрупповом диффузионном приближении. В программе используется детальное поэлементное описание активной зоны.

Программный модуль SYNTEZ внедрен в код СОКРАТ-БН/В2 для расчета тяжелых аварий на реакторной установке (РУ) БН-1200 при работе реактора на мощности [4]. В отличие от расчетного кода JAR-FR описание модели активной зоны (а. з.) выполняют в  $R-Z$ -геометрии. При этом всю зону разбивают на отдельные радиальные слои.

Переход в другое представление модели зоны и связанные с этим разбиения на расчетные элементы является основной особенностью в конвертации данных между расчетными моделями.

### Реализация передачи модели

Реализация передачи модели из входного файла кода JAR-FR во входной файл модуля SYNTEZ выполнена в виде интерактивного программного конвертера, поддерживающего работу в ОС Windows (версии 10 и выше) и Linux CentOS (версии 6.0 и выше).

Внешний вид конвертера представлен на рис. 1.

Преобразование данных происходит в интерактивном режиме. В результате автоматической обработки входного файла JAR-FR в конвертере формируется модель, описывающая картограмму активной зоны, геометрические параметры, количество и типы тепловыделяющих сборок (ТВС) и органов системы управления и защиты (СУЗ), их материальный состав. Далее конвертер выполняет преобразование модели активной зоны, реализуя переход к  $R-Z$ -геометрии. При этом происходят автоматическое разбиение зоны на радиальные слои и пересчет необходимых параметров. Затем пользователь при необходимости проводит дополнительную обработку и настройку параметров модели и выполняет выгрузку входного файла для модуля SYNTEZ.

№ Слоя	Количество ячеек	Радиальный размер ячеек	Аксиальный размер ячеек в слое Минимум	Аксиальный размер ячеек в слое Максимум
1	2	5.19892	1	1
2	2	39.2207	1	1
3	2	44.8748	1	1
4	2	43.1506	1	1
5	2	44.5475	1	1
6	2	43.3951	1	1

```

20:09:43 MainWindow Information #Import файла: C:\Users\gusev\Desktop\проект БН600_JARFR\BN600_01M2.dat
20:09:43 JnFrReader Notice #Import модели...
20:09:43 JnFrReader Notice Тип геометрии: цилиндрическое отклонение относительно оси симметрии
20:09:43 JnFrReader Notice Количество типов сборок: 26
20:09:43 JnFrReader Notice Инициализация материалов, количество зон: 95
20:09:43 JnFrReader Notice Условие определения органов СУЗ, количество типов: 6, количество сборок: 27
20:09:43 JnFrReader Notice #Export модели завершен.
  
```

Рис. 1. Внешний вид конвертера



Процедуру подготовки модели SYNTEZ выполняют по следующим этапам:

- загрузка входного файла JAR-FR;
- просмотр и редактирование картограммы а. з.;
- задание параметров СУЗ;
- задание радиального распределения а. з.;
- задание разбиения радиальных слоев на расчетные ячейки;
- просмотр  $R-Z$ -представления;
- просмотр и редактирование нуклидных концентраций материальных зон;
- редактирование аксиального распределения и состава ТБС;
- редактирование аксиального распределения и состава СУЗ;
- выполнение расчетов эффективности СУЗ;
- выгрузка входного файла модуля SYNTEZ.

Необходимо отметить, что ввиду достаточно длительного процесса подготовки входного файла SYNTEZ (может занимать не один день) реализована возможность сохранения состояния подготовки входного файла в файле проекта формата JSON и его последующего чтения для редактирования. Кроме того, данный подход позволяет реализовать подготовку различных вариантов расчетной модели на основе единой модели JAR-FR.

Далее кратко представим основной инструментарий и возможности конвертера по основным его вкладкам.

### Основные параметры

Выполнение подготовки входного файла модуля SYNTEZ начинают с загрузки входного файла JAR-FR. Для этого необходимо нажать



кнопку панели инструментов или воспользоваться пунктом меню "Файл/Импорт...". В открывшемся окне надо указать расположение входного файла JAR-FR.

В фоновом режиме конвертер производит чтение входного файла JAR-FR и первичное формирование данных в проекте подготовки файла SYNTEZ. В результате будут заполнены соответствующие параметры на вкладках конвертера. Вид первой вкладки основного окна "Параметры" представлен на рис. 1.




Вверху справа представлена основная статистическая информация модели. При необходимости пользователь может отредактировать линейный размер сборки и начальную температуру в зонах.

В таблице "Параметры расчетной сетки" представлена информация по радиальному разбиению модели. Первичное разбиение выполняется автоматически на основе введенных параметров "по умолчанию" в настройках конвертера.

Картограмма а. з. строится автоматически на основе загруженной модели. Вывод картограммы производится на вкладку "Картограмма" (рис. 2). Номерами и соответствующим цветом на картограмме показаны типы сборок.

С правой стороны показана таблица типов сборок, в которой приведен перечень типов сборок и указано их количество в модели.

В левом углу расположены элементы для переключения между различными представлениями картограммы:

-  — расположение сборок а. з.;
-  — расположение СУЗ;
-  — радиальное разбиение.

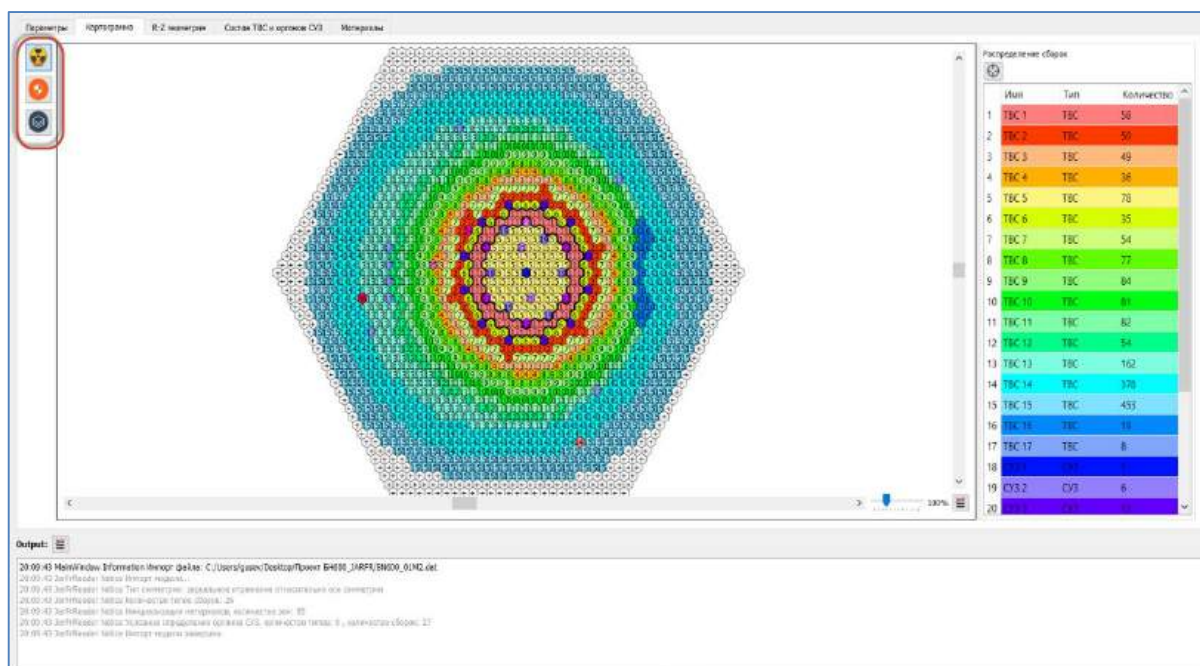


Рис. 2. Картограмма а. з.

Картограмма активной зоны реализована в интерактивном виде и позволяет выполнять следующие функции:

- просмотр расположения сборок на картограмме;
- добавление новых сборок на картограмму;
- изменение расположения типов сборок на картограмме;
- изменение типов и наименования типов сборок.

Для редактирования параметров СУЗ используют второе представление картограммы а. з., показанное на рис. 3.

На данном представлении картограммы выделены только сборки СУЗ. В правой части окна представлена таблица с параметрами всех сборок СУЗ. Цветом и наименованием выделены отдельные типы СУЗ.

В данном представлении картограммы можно выполнять:

- просмотр расположения СУЗ на картограмме;
- изменение номеров СУЗ;
- задание параметров СУЗ;
- задание нулевого уровня СУЗ;
- расчет эффективности СУЗ.

Кроме того, конвертер обеспечивает проведение расчета  $K_{\text{эф.крит}}$ ,  $K_{\text{эф}}$  отдельного СУЗ,  $K_{\text{эф}}$  группы СУЗ с использованием локальной версии модуля SYNTEZ. При этом реализована возможность формирования сценариев расчетов из расчетных задач и проведения повторных расчетов после корректировки материальных составов, структуры а. з. или состава ТВС и СУЗ.

При конвертировании модели необходимо выполнить переход к  $R-Z$ -представлению а. з. Для этого требуется разделить а. з. на соответствующее количество радиальных слоев с объединением материалов сборок. Данное разделение выполняется на третьем представлении картограммы а. з., показанном на рис. 4.

В рабочей области окна представлена картограмма, где номерами обозначены типы сборок, а цветом выделены радиальные слои.

В правой части окна находится таблица радиальных слоев, где представлены их перечень и статистические данные по вхождению в них сборок и радиусам.

На данном представлении картограммы также в интерактивном виде возможно выполнение следующих действий:

- просмотр расположения радиальных слоев на картограмме;
- изменение количества радиальных слоев;
- автоматическое разбиение на радиальные слои;
- распределение сборок по радиальным слоям в ручном режиме;
- изменение наименований радиальных слоев.

Для подготовки входного файла SYNTEZ необходимо описать материальный состав сборок ТВС и СУЗ. Описание материального состава сборок представлено на основе описания материальных зон. Каждая материальная зона описана соответствующим набором нуклидов и их концентраций.

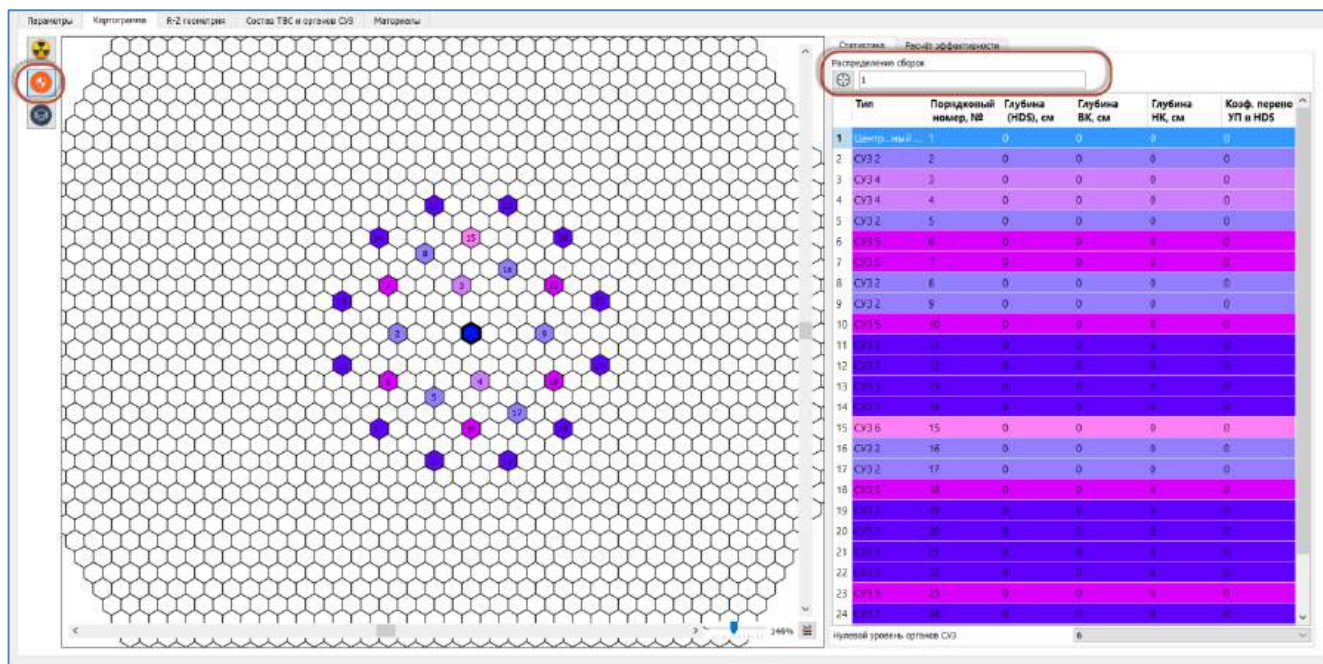


Рис. 3. Картограмма СУЗ



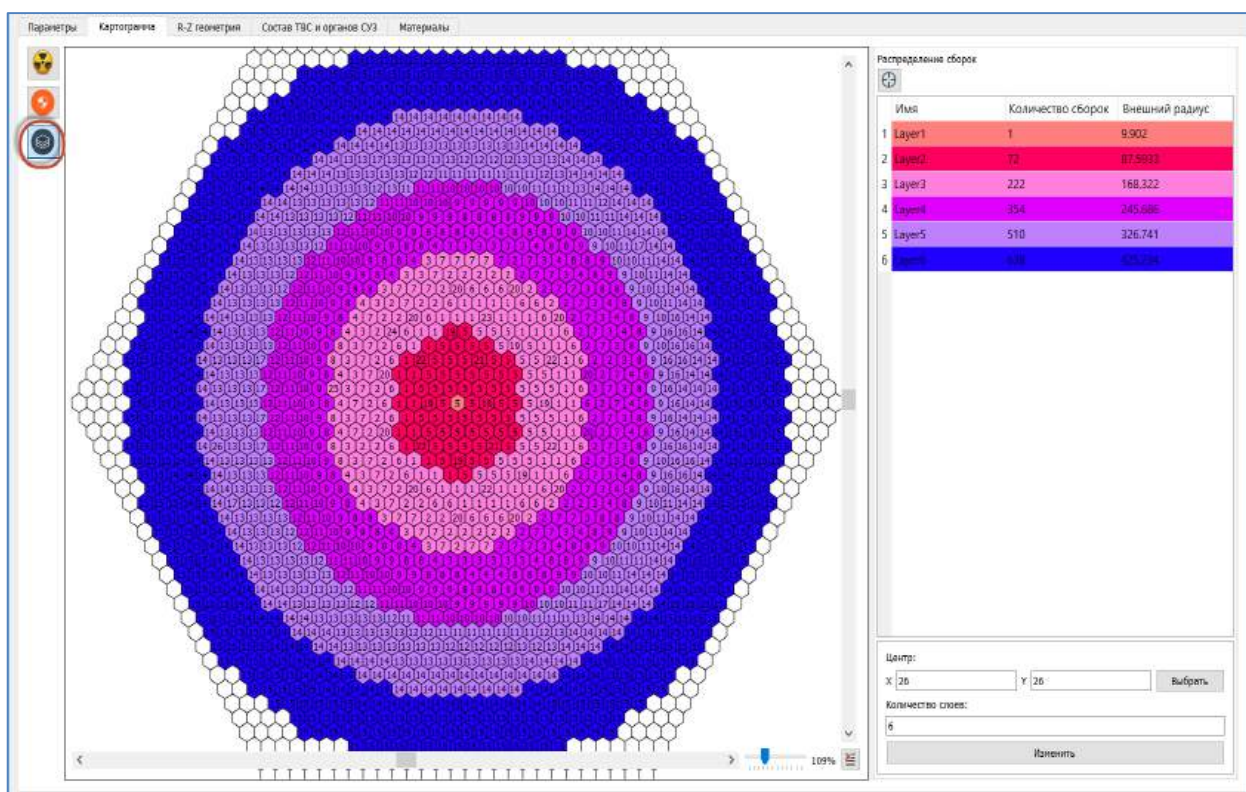


Рис. 4. Представление картограммы с радиальным распределением

Описание материальных зон реализовано в табличном виде на вкладке "Материалы" (рис. 5). В столбцах таблицы приведен перечень нуклидов, в строках — номера материальных зон, в ячейках выведены концентрации нуклида для каждой зоны.

Первоначально количество материальных зон, перечень нуклидов и их концентрации внесены на основании загруженной модели JAR-FR. Пользователь может откорректировать их по своему усмотрению.

На вкладке "Материалы" возможно выполнение пользователем следующих действий:

- просмотр таблицы концентрации нуклидов;
- добавление/удаление нуклидов в таблице;
- добавление/удаление материальных зон в таблице;
- редактирование концентрации выбранного нуклида;
- сохранение таблицы в формате CSV.

Параметры	Картограмма	R-2 геометрия	Состав ТВС и органов СУЗ	Материалы											
Имя	Количество сборок	Внешний радиус													
Layer1	1	9.902													
Layer2	72	87.5932													
Layer3	222	168.322													
Layer4	354	245.686													
Layer5	510	326.741													
Layer6	608	405.084													
Центр:	X: 26	Y: 26		Выбор											
Количество слоев:	6														
Имя:				Изменить											
Имя	Количество сборок	Внешний радиус													
1	1.1894e-05	4.9913e-05	6.6925e-05	1.2973e-04	4.0411e-06	9.2370e-08	0.0000e+00	2.2298e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
2	1.5174e-05	4.9586e-05	6.3034e-05	1.0160e-04	2.4164e-06	4.3864e-08	0.0000e+00	2.2298e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
3	1.9566e-01	4.5614e-05	6.0247e-05	7.1185e-05	1.1803e-06	1.5510e-08	0.0000e+00	1.9772e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
4	1.9380e-03	5.2608e-05	6.0177e-05	8.1660e-05	1.3729e-06	2.3464e-08	0.0000e+00	2.2014e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
5	1.1734e-03	5.2895e-05	6.6790e-05	1.3919e-04	4.7454e-06	1.1760e-07	0.0000e+00	2.3669e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
6	1.4895e-03	5.5903e-05	6.3013e-05	1.1431e-04	3.1648e-06	6.5529e-07	0.0000e+00	2.4775e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
7	1.9188e-03	5.2752e-05	6.0073e-05	8.2618e-05	1.5138e-06	2.6485e-08	0.0000e+00	2.3398e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
8	1.1208e-01	8.1451e-05	6.6312e-05	1.5453e-04	6.5804e-06	1.9100e-07	0.0000e+00	2.9933e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
9	1.4404e-03	8.1561e-05	6.3478e-05	1.3211e-04	4.1331e-06	9.7447e-08	0.0000e+00	3.0394e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
10	1.8756e-03	6.0633e-05	5.9848e-05	9.5633e-05	2.1634e-06	3.7975e-08	0.0000e+00	2.7029e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
11	1.8353e-03	7.0363e-05	5.9687e-05	1.9034e-04	2.9142e-06	5.8974e-08	0.0000e+00	3.0911e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
12	1.1953e-03	6.5267e-05	6.6171e-05	1.7480e-04	7.5126e-06	2.3275e-07	0.0000e+00	3.1757e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
13	1.4085e-03	7.0611e-05	6.3287e-05	1.6602e-04	5.2861e-06	1.4086e-07	0.0000e+00	3.3177e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
14	1.8298e-03	6.8816e-05	5.9043e-05	1.0900e-04	2.8395e-06	5.7026e-08	0.0000e+00	3.2222e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
15	1.1855e-03	5.2257e-05	6.6736e-05	1.3985e-04	4.3385e-06	1.0875e-07	0.0000e+00	2.4020e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
16	1.4896e-03	5.3629e-05	6.3299e-05	1.1174e-04	2.8207e-06	5.4574e-08	0.0000e+00	2.5403e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
17	1.9145e-03	5.2978e-05	6.0312e-05	8.3443e-05	1.5134e-06	2.6433e-08	0.0000e+00	2.3024e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
18	1.8772e-03	6.1997e-05	5.9886e-05	9.7013e-05	2.2079e-06	3.8033e-08	0.0000e+00	2.6694e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
19	1.1308e-03	5.4870e-05	6.6633e-05	1.7008e-04	5.0819e-06	1.2885e-07	0.0000e+00	2.6079e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
20	1.4835e-03	5.9531e-05	6.3635e-05	1.2882e-04	3.5818e-06	7.8100e-08	0.0000e+00	2.7803e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
21	1.8777e-03	5.9459e-05	5.9075e-05	9.4127e-05	2.0553e-06	3.5058e-08	0.0000e+00	2.7603e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430
22	1.2410e-03	3.4780e-05	6.1613e-05	8.1733e-05	2.7071e-06	3.1020e-08	0.0000e+00	1.4391e-04	1.6380e-02	7.7090e-03	1.2870e-02	2.8480e-03	1.6270e-03	2.0350e-04	1.5430

Рис. 5. Вкладка "Материалы"

Состав ТВС и СУЗ формируют из материальных зон, описанных в таблице концентраций на вкладке "Материалы". Первоначальное заполнение состава ТВС и СУЗ осуществляют на основе загруженной модели JAR-FR. Состав ТВС на основе номеров физических зон описан на вкладке "Состав ТВС и органов СУЗ" (рис. 6). Материальный состав СУЗ представлен аналогичным образом в виде таблицы на соответствующей вкладке.

В ячейках указаны номера зон из таблицы концентраций нуклидов. Для удобства анализа использована цветовая схема раскраски по номерам физических зон.

При редактировании состава ТВС и СУЗ можно выполнять следующие действия:

- добавить/удалить аксиальный слой;
- объединить выбранные слои;
- изменить аксиальный размер слоя;
- выполнить автоматическое объединение слоев;
- выгрузить таблицу в формат CSV.

После завершения редактирования всех необходимых параметров а. з. пользователь может сформировать входной файл модуля SYNTEZ, полностью готовый для проведения расчетов.

## Заключение

Представлено описание программной реализации конвертера расчетной модели из входного файла трехмерного нейтронно-физического кода JAR-FR в нейтронно-физический модуль SYNTEZ расчетного кода СОКРАТ-БН/В2. Создание модели одного модуля на базе модели другого позволяет решить две задачи. Во-первых, появляется возможность в значительной мере сократить время подготовки входных файлов для расчета безопасности РУ за счет использования большого объема разработанных ранее моделей для кода JAR-FR. Во-вторых, обеспечивается возможность расчетов эксплуатационных характеристик РУ и расчетов критериев их безопасности на единых исходных моделях. Это должно позволить снизить вероятность возникновения ошибок при подготовке расчетных моделей и повысить степень доверия к расчетным обоснованиям.

Планируется проведение опытной эксплуатации конвертера и переход на его промышленное использование при проведении расчетных обоснований безопасности РУ.

		Состав ТВС и органов СУЗ																			
	dH	TBC 1	TBC 2	TBC 3	TBC 4	TBC 5	TBC 6	TBC 7	TBC 8	TBC 9	TBC 10	TBC 11	TBC 12	TBC 13	TBC 14	TBC 15	TBC 16	TBC 17	TBC 24	TBC 25	TBC 26
60	3.000	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71	72	73	74	75	76	70	70	70
59	3.000	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71	72	73	74	75	76	70	70	70
58	3.000	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71	72	73	74	75	76	70	70	70
57	3.000	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71	72	73	74	75	76	70	70	70
56	3.000	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71	72	73	74	75	76	70	70	70
55	2.000	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71	72	73	74	75	76	70	70	70
54	2.000	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71	72	73	74	75	76	70	70	70
53	2.000	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71	72	73	74	75	76	70	70	70
52	2.000	70	70	70	70	70	70	70	71	71	71	71	71	72	73	74	75	76	70	70	70
51	2.000	38	39	40	41	38	39	40	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	66
50	2.000	38	39	40	41	38	39	40	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	69
49	2.000	38	39	40	41	38	39	40	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	66
48	2.000	38	39	40	41	38	39	40	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	66
47	3.000	38	39	40	41	38	39	40	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	69
46	3.000	38	39	40	41	38	39	40	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	66
45	3.000	38	39	40	41	38	39	40	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	69
44	3.000	38	39	40	41	38	39	40	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	66
43	3.000	38	39	40	41	38	39	40	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	66
42	2.000	34	35	36	37	34	35	36	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	68
41	2.000	34	35	36	37	34	35	36	47	50	53	56	59	62	73	74	75	76	92	92	68
40	2.000	22	23	24	25	26	27	28	45	48	51	54	57	60	73	74	75	76	92	92	66
39	2.000	22	23	24	25	26	27	28	45	48	51	54	57	60	73	74	75	76	92	92	66

Рис. 6. Вкладка "Состав ТВС и органов СУЗ"



**Литература**

1. Васильев Б. А. и др. Опыт и перспективы модернизации активной зоны реактора БН-600 // Ядерная энергетика. 2011. № 1. С. 158—168.
2. Васильев Б. А. и др. Анализ опыта эксплуатации реактора БН-600 в период с 2010 года и достигнутый уровень надежности оборудования: тез. докл. Десятой междунар. научн.-техн. конф. "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики". 25—27 мая 2016 г. — М.: ВНИИАЭС, 2016. С. 43—45.
3. Белов С. Б., Васильев Б. А., Фаракишин М. Р., Таланов П. А., Казанцев А. З., Климашина Т. А., Радионичева А. А. Обоснование работоспособности твэлов с оболочками из стали ЭК164-ИД в реакторе БН-600. Междунар. конф. МАГАТЭ по быстрым реакторам и топливному циклу (FR17). 26—29 июня 2017 г., Екатеринбург.
4. Васильев Б. А. и др. Перспективы развития активной зоны реактора БН-800: тез. докл. Десятой междунар. научн.-техн. конф. "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики". 25—27 мая 2016 г. — М.: ВНИИАЭС, 2016. С. 34—36.
5. Васильев Б. А. Освоение МОКС-топлива в БН-800 // Росэнергоатом: журнал атомной энергетики России. 2014. № 11. С. 18—23.
6. Белов С. Б., Шеряков В. С., Васильев Б. А., Фаракишин М. Р. Активная зона БН-800 на МОКС-топливе: Междунар. конф. МАГАТЭ по быстрым реакторам и топливному циклу (FR17), Екатеринбург, 26—29 июня 2017 г.

дунар. конф. МАГАТЭ по быстрым реакторам и топливному циклу (FR17), Екатеринбург, 26—29 июня 2017 г.

7. Жеребцов А. А. и др. Программа НИОКР по ЗЯТЦ с использованием БН-800: сб. аннот. докл. "Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах". Отраслевая конф. Томск. 11—12 октября 2018 г. С. 53—54.

8. Белов С. Б., Васильев Б. А., Фаракишин М. Р. Обеспечение работы активной зоны реактора БН-1200 в равновесном режиме при использовании нитридного топлива и МОКС-топлива. Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: тез. докл. 3-й МНТК "НИКИЭТ-2014", 7—10 октября 2014 г. М.: АО "НИКИЭТ". С. 38—39.

9. Васильев Б. А., Фаракишин М. Р., Белов С. Б., Киселев А. В., Клинов Д. А., Гулевич А. В., Елисеев В. А., Малышева И. В. Особенности конструкции активной зоны реактора БН-1200 при использовании нитридного и МОКС-топлива: Междунар. конф. МАГАТЭ по быстрым реакторам и топливному циклу (FR17). Екатеринбург. 26—29 июня 2017 г.

10. НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций.

11. Большов Л. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф., Шмидт О. В. Расчетные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2016. № 6. С. 303—312.

## IMPLEMENTATION OF DIRECT MODELING METHODS FOR NEUTRON-PHYSICAL CALCULATION CODES IN PRACTICE

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

*This article discusses the direct modeling method using the SOKRAT-BN / B2 calculated reasonable code and the construction of computational models based on the JAR-FR neutron-physical code models.*

**Keywords:** calculation code, neutron-physical code, calculation justifications, calculation model, SOKRAT-BN.

Сумароков Сергей Вячеславович, заведующий отделом.

E-mail: sumarokov@ibrae.ac.ru

Арутюнян Артем Рафаэлевич, научный сотрудник.

E-mail: artem@ibrae.ac.ru

Гусев Михаил Владимирович, главный специалист.

E-mail: gusev@ibrae.ac.ru

Кечков Алексей Александрович, ведущий инженер.

E-mail: kechkov@ibrae.ac.ru

Новосельский Филипп Олегович, заместитель заведующего отделом.

E-mail: pn@ibrae.ac.ru

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2020 г.

УДК 004:681.5:658

## КЖЦ-РЕШЕНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ

В. Б. Кондусова, канд. эконом. наук; Д. В. Кондусов; А. И. Сергеев, д-р техн. наук;  
А. И. Сердюк, д-р техн. наук  
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

*Рассмотрен институт контракта жизненного цикла (КЖЦ), обеспечивающий эффективное взаимодействие изготовителя с потребителем наукоемких изделий. Схематично показаны КЖЦ-решения в условиях применения PLM-системы как инструмента информационной поддержки жизненного цикла изделий при автоматизации взаимодействия изготовителя и потребителя. Представлен обзор видов моделей КЖЦ.*

**Ключевые слова:** контракт жизненного цикла, информационная поддержка, PLM, жизненный цикл, проектирование, производство, эксплуатация, изготовитель, потребитель.

Цифровизация, импортнезависимость и современные мировые тенденции диктуют новые требования и условия обеспечения процессов проектирования, производства и эксплуатации в высокотехнологичных отраслях промышленности. Информационная поддержка жизненного цикла (ЖЦ) нуждается в повышении уровня автоматизации в части взаимодействия изготовителя и потребителя наукоемких изделий путем использования системы контрактации. Данная система обеспечит адаптирование номенклатуры продукции машиностроительного комплекса к новым условиям на российском и мировом рынке для устойчивого владения перспективными рыночными нишами и придания инновационного импульса развитию машиностроительных производств.

Авторами изучены научные изыскания в области повышения эффективности информационной поддержки этапов ЖЦ проектирование—производство—эксплуатация [1—3] и автоматизации производства [4].

Подобные отечественные разработки проводили для автомобильной техники (исследование, разработка, внедрение и развитие процессов системы управления полным ЖЦ [5]), а также в области управления рисками изделий военного назначения на основе информационно-системного подхода [6].

Зарубежные методики [7, 8], регулирующие взаимодействие изготовителя и потребителя на этапах проектирования, производства и эксплуатации, нуждаются в существенных доработках и внесении изменений ввиду особенностей отечественного машиностроения. Информационная поддержка регулирует взаимодействие изготовителя и потребителя на этапах проектирования и производства до момента передачи изделия потребителю, не охватывая этап эксплуатации во взаимодействии с предыдущими. Обслуживающие организации получают прибыль за счет

процесса, а не результата, т. е. получают прибыль от технического обслуживания и ремонта (ТОиР), а не за обеспечение уровня готовности изделия.

Соглашения между изготовителем и потребителем строятся следующим образом: потребитель желает получить изделия определенного качества в указанные сроки за совместно установленную сторонами стоимость, а изготовитель — указанную в контракте сумму, затратив минимальные усилия. Однако современные условия диктуют определенные нюансы: со стороны потребителя возникают постоянно нарастающие потребности, выраженные в научно-технических и технологических сложностях, со стороны изготовителя — усложняющиеся условия проектного, технологического и эксплуатационного обеспечения изделия. Все это обуславливает появление множества технико-экономических проблем при взаимодействии изготовителя и потребителя наукоемких изделий, выражаемых в нестыковках, односторонних толкованиях и других особенностях, свойственных цифровой экономике периода глобализации.

Необходимы новые решения, одним из которых может стать создание системы контрактации. Контракт жизненного цикла (КЖЦ) — это договор, предусматривающий создание и поставку изделия, создание объекта и (или) предоставление услуг по обеспечению эксплуатации и (или) ремонта изделия или объекта в течение всего срока службы, а также последующую утилизацию такого изделия или объекта (рис. 1) [9].

КЖЦ-решения — это инструмент информационной поддержки проектирования, производства и эксплуатации наукоемких изделий, оптимально реализующий свое назначение посредством встраивания в PLM-систему (рис. 2).

КЖЦ-решения выступают механизмом автоматизации взаимодействия изготовителя с потребителем (рис. 3).



Рис. 1. Институт КЖЦ

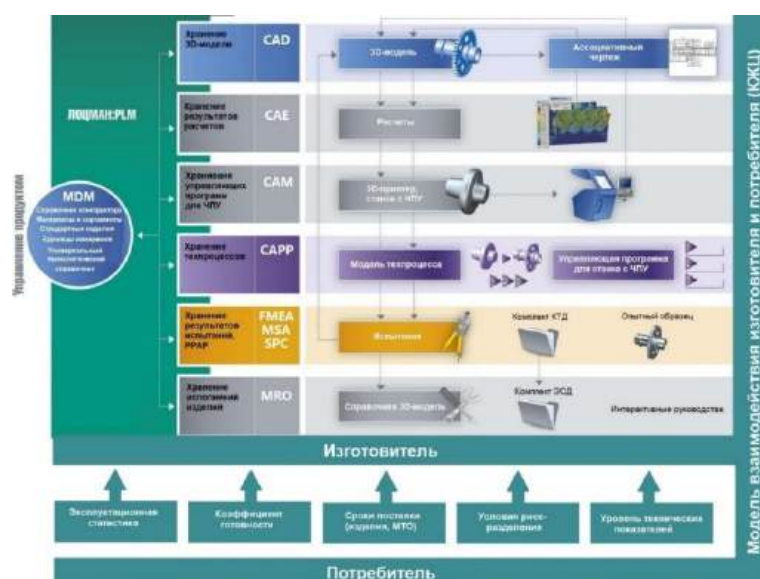


Рис. 2. Реализация назначения КЖЦ посредством встраивания в PLM-систему

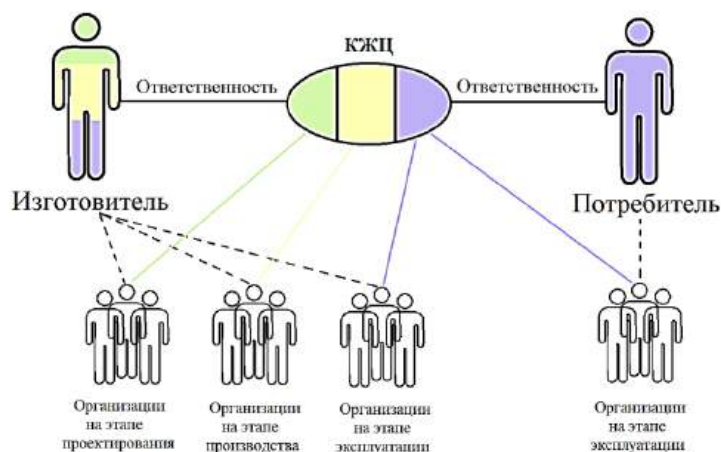


Рис. 3. Механизм взаимодействия изготовителя с потребителем

КЖЦ варьируют в зависимости от степени ответственности изготовителя за те затраты, которые изготовитель несет при его выполнении, за достижение предусмотренных контрактом технико-тактических или иных параметров ко-

нечного изделия, а также за соблюдение договорных сроков поставки. Кроме того, контракты можно различать по механизмам стимулирования изготовителя к достижению оговоренных в контракте целей (таблица) [9, 10].

## Виды моделей КЖЦ, их область и условия применения

Группа моделей КЖЦ	Разделение риска в зависимости от модели КЖЦ	Вид моделей КЖЦ	Область и условия применения моделей КЖЦ	
С фиксированной ценой	Риск на изготовителе	С твердо фиксированной ценой	Цена может быть обоснована с самого начала, например имеются адекватная определенная конструкция или представление спецификации, реальная оценка, достаточная конкуренция, действительные затраты или данные о ценообразовании по контракту, которые обеспечат правильное сравнение цен	
		С фиксированной ценой и ее последующей корректировкой по скользящей шкале цен	Условия на рынке труда нестабильны на протяжении длительного периода изготовления изделия	
		С фиксированной ценой плюс дополнительная прибыль	В самом начале трудно определить затраты изготовителя, либо есть возможность сокращения затрат на проектирование и производство или улучшения эксплуатационных показателей поставляемой продукции на основе: <ul style="list-style-type: none"> <li>• предоставления изготовителю меры ответственности за затраты на проектирование и производство;</li> <li>• выплаты поощрения на базе дополнительной прибыли</li> </ul>	
		С фиксированной ценой с последующей переоценкой	Существует ограничение во времени и другие виды контрактов неприменимы. Устанавливают время или периоды времени: количество изделий и цену устанавливают на определенный период времени, на последующие периоды выполнения контракта данные установки не распространяются. Таким образом, реальная фиксированная цена не может быть установлена изначально	
С возмещением затрат на проектирование и производство	Между изготовителем и потребителем	С возмещением затрат на проектирование и производство	Нет возможности точно оценить затраты на проектирование и производство	Для проведения НИОКР с бесприбыльными организациями или учебными заведениями, а также для управления государственным оборудованием, экспериментальными, опытными и промышленными установками, полигонами и испытательными системами; Для проведения программ НИОКР, совместно финансируемых правительством и изготовителем, где изготовитель получает определенную коммерческую выгоду вместо прибыли по контракту
С возмещением затрат на проектирование и производство	Между изготовителем и потребителем	С возмещением затрат на проектирование и производство плюс дополнительная прибыль	Нет возможности точно оценить затраты на проектирование и производство	Для разработок новой техники и технологии и их испытаний. Контракт обеспечивает активное стимулирование изготовителя к эффективному выполнению контракта посредством дополнительной прибыли, например за экономию затрат на проектирование и производство, соблюдение сроков, эксплуатационные показатели изделия
		С возмещением затрат на проектирование и производство плюс фиксированная прибыль		Для проведения НИР, поисковых разработок или научных исследований, когда общий объем работы изначально не известен, или для разработки и испытаний, когда применение контракта с возмещением затрат на проектирование и производство плюс дополнительная прибыль невозможно
Другие виды для специальных целей	Разделение риска отсутствует	Трудовые затраты по почасовым ставкам и материалы	Контракт "время и материалы" применяют, когда изначально невозможно оценить масштабы или продолжительность работы; контракт "трудочасы" применяют, когда не используют материалы, инженерные или конструкторские разработки, ремонт, эксплуатация	
		С неопределенным сроком поставки	Применяют, когда: <ul style="list-style-type: none"> <li>• точное время поставки изделия неизвестно;</li> <li>• количество поставляемых изделий известно;</li> <li>• период поставки можно установить;</li> <li>• изделия в наличии, но есть задержка в их поставке;</li> <li>• требования изначально неизвестны;</li> <li>• количество необходимых ресурсов для изготовления изделия определить невозможно</li> </ul>	
		Кредитный контракт (кредитное письмо)	Для обеспечения начала работы по будущему контракту	



В Российской Федерации применяют модели КЖЦ первой группы. Недостатком здесь является отсутствие риск-разделенного партнерства. Модели КЖЦ второй и третьей групп не применяются в РФ и они не находят своего отражения в законодательстве, но большой интерес представляет вторая группа моделей КЖЦ, учитывающая доленое участие сторон и получение поощрительного вознаграждения как стимула к сокращению затрат на проектирование и производство для получения дополнительной прибыли. Третья группа моделей КЖЦ не представляет интереса, так как предназначена для специальных целей (решения отдельных вопросов, узких задач), не позволяет охватить весь жизненный цикл изделия, не учитывает все виды работ.

Реализация КЖЦ-решений по второй группе моделей как инструмента информационной поддержки проектирования, производства и эксплуатации наукоемких изделий позволит добиться:

- улучшения конструкторских и технологических параметров на этапах проектирования и производства;
- повышения уровня готовности наукоемких изделий;
- снижения стоимости ЖЦ;
- повышения прибыли производителя, обслуживающей организации и сокращения затрат заказчика наукоемких изделий;
- повышения общей готовности машиностроительных предприятий к выполнению гособоронзаказа качественно и в минимальные сроки.

#### Литература

1. Кондусова В. Б., Кондусов Д. В. Разработка имитационной модели жизненного цикла сложных изделий машиностроения с длительным сроком эксплуатации на основе применения контракта жизненного цикла // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 2. С. 30—34.
2. Kuznetsova V. B., Serdyuk A. I., Kondusov D. V., Sergeev A. I. Contract model with risk sharing in integrated logistical product support // Russian Engineering Research. 2018. V. 38. № 8. P. 614—616. DOI: 10.3103/S1068798X18080099
3. Кондусова В. Б., Кондусов Д. В., Сергеев А. И., Сердюк А. И. Контракты жизненного цикла наукоемких изделий как средство информационного взаимодействия изготовителя и потребителя // Автоматизация в промышленности. 2019. № 10. С. 56—59.
4. Радугин А. Б., Сердюк А. И., Сергеев А. И. Метод нормирования надежности оборудования при проектировании гибких производственных систем // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 10. С. 103—108.
5. Заяц Ю. А., Сальников А. В., Масленникова И. Л. Критерии оценки выполнения условий контрактов жизненного цикла автомобильной техники на стадии эксплуатации и риски их применения // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 3. С. 504—513.
6. Вященко Ю. Л., Иванов К. М., Афанасьев А. С., Игнатенко В. В., Павлушкин Р. В. Повышение эффективности управления жизненным циклом системы оружия на основе информационно-системной методологии // Геополитика и безопасность. 2016. № 3—4 (35—36). С. 106—113.
7. Settanni E., Newnes L. B., Thenent N. E., Parry G., Goh Y. M. A through-life costing methodology for use in product-service-systems // Int. J. Production Economics. 2014. № 153. P. 161—177.
8. Xiang Y., Zhu Zh., Coit D. W., Feng Q. Condition-based maintenance under performance-based contracting // Computers & Industrial Engineering. 2017. № 111. P. 391—402.
9. ГОСТ Р 56136-2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2015. — 11 с.
10. Федорович В. А., Муравник В. Б., Бочкарев О. И. США: военная экономика (организация и управление) / под общ. ред. Золоторева П. С., Роговского Е. А. — М.: Междунар. отношения, 2013. — 616 с.

## LCA-SOLUTIONS AS A TOOL OF INFORMATION SUPPORT FOR THE DESIGN, PRODUCTION AND OPERATION OF HIGH TECHNOLOGY PRODUCTS

V. B. Kondusova, D. V. Kondusov, A. I. Sergeev, A. I. Serduk  
Orenburg State University, Orenburg, Russia

*The article discusses the life cycle contract institute (LCA), which ensures the effective interaction of the manufacturer with the consumer of high technology products. SCLC solutions are schematically considered in the context of using the PLM system as a tool for information support of the product life cycle in the context of automation of interaction between the manufacturer and the consumer.*

*An overview of the types of LCA models is presented.*

**Keywords:** life cycle contract, information support, PLM, life cycle, design, production, operation, manufacturer, consumer.

Кондусова Валентина Борисовна, доцент.  
E-mail: valyosha@list.ru  
Кондусов Дмитрий Викторович, аспирант.  
E-mail: kdimka@list.ru  
Сергеев Александр Иванович, профессор.  
E-mail: alexandr\_sergeew@mail.ru  
Сердюк Анатолий Иванович, профессор.  
E-mail: sap@mail.osu.ru

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2020 г.

## ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ИНФОРМАТИКЕ

П. А. Правильщиков, канд. техн. наук

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

*Рассматривается процесс решения сложных задач в информатике и информационных технологиях (ИТ) в качестве специфической формы движения в дискретном лабиринте. Такая форма движения характеризуется соответствующими законами, в частности законами сохранения. Ранее из дискретного аналога известной "физической" теоремы Нётер в качестве следствия был выведен закон сохранения перебора (ЗСП). Здесь показано, что процесс решения некоторых задач, в частности задачи построения тестов для комбинационных устройств (КУ), процесс решения булевых уравнений, характеризуется еще и законом сохранения количества информации (ЗСКИ), тесно связанным с ЗСП.*

**Ключевые слова:** перебор, количество информации, закон сохранения перебора, закон сохранения количества информации, квантовые компьютеры, классические и квантовые  $D$ -алгоритмы.

В каждой отрасли знания существуют собственные законы. Законы отражают некоторый порядок в окружающей действительности. В частности, законы физики отражают связь физических явлений и определяют порядок в физическом мире, образуя скелет Вселенной. Они служат ей опорой, связывают воедино. Особый класс физических законов образуют законы сохранения. Одни из законов сохранения выполняются всегда (например, законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда). Другие законы сохранения являются приближенными и выполняются при определенных условиях. Некоторые физики считают, что законы сохранения являются элементами абсолютной истины нашей Вселенной [1].

Если говорить о законах, посвященных законам сохранения в информатике (*computer science*), не хватит места перечислить законы других дисциплин (см., например, [2]). Но законы *computer science*, связанные с классическими и квантовыми ИТ, упомянуть необходимо. Первым из таких законов является закон Амдала (*Amdahl's law*), выявляющий непреодолимое ограничение на рост производительности при распараллеливании вычислений: ускорение программы за счет распараллеливания ее инструкций на множестве вычислителей ограничено временем  $\Delta t_{\text{пос}}$ , необходимым для выполнения части ее последовательных инструкций. Например, если последовательная часть программы  $P$  (т. е. 5 % ее инструкций) выполняется за 5 мин, то выполнить  $P$ , увеличивая распараллеливание, быстрее 5 мин невозможно [3]. Закон Густафсона (*Gustafson's law*) оценивает максимально достижимое ускорение выполнения параллельной программы в зависимости от количества одновременно выполняемых потоков вычислений (*процессоров*) и доли последовательных расчетов [4]. Иногда этот закон называют переоценкой закона Амдала. Закон Литтла (*Little's law*) — закон, показывающий как преодолеть "барьер памяти" по мере роста быстродействия процессоров классических компьютеров при использовании, например, "зашкаленной" архи-

тектуры суперкомпьютеров (зашкаленную архитектуру иногда называют механизмом зашкаленного параллелизма) [5]. Для этого необходимо расширять (распараллеливать) шину и увеличивать ее быстродействие. В соответствии с законом Литтла величина параллелизма, необходимого для того, чтобы замаскировать задержку при обращении к памяти, будет продолжать увеличиваться по мере того, как увеличивается пропасть между быстродействием классического процессора и быстродействием памяти. Как утверждается в [5], если задержка при обращении к памяти уменьшается приблизительно на 6 % в год, то эта пропасть продолжит расти, даже несмотря на уменьшение темпа роста быстродействия классических процессоров с достигнутых 60 % в год до приблизительно 20 % в год. В информатике существуют еще два закона сохранения: закон сохранения перебора (ЗСП) и закон сохранения количества информации (ЗСКИ) [6—9]. Здесь показаны суть ЗСП и его связь с ЗСКИ, а также один из методов вычисления количества информации на основе полного перебора.

Сохранение информации активно изучается в физике и в астрофизике (например, при изучении черных дыр). Кроме того, оно вызывает интерес в связи с утверждениями американского физика Дж. А. Уилера (*J. A. Wheeler*), который считал, что в ближайшие десятилетия XX и XXI вв. доминантной темой будет информация, так как "It from bit" (*все из бита*) [10]. Традиционно физика рассматривала и изучала такие объекты, как планеты, камни, молекулы, атомы, частицы, поля и силы, влияющие на их поведение и управляющие их взаимодействиями. Но Уилер полагал, что физические объекты следует рассматривать как вторичные, т. е. как носители более фундаментальной сущности — информации. Уилер не утверждал, что вещество и излучение являются эфемерными. Но он считал, что их следует рассматривать как материальные проявления чего-то более фундаментального, так как информация, т. е. сведения о том, где находится частица, времени ее жизни, каков ее спин, положителен ли ее заряд или

отрицателен и т. д., образует цельное ядро в физической реальности. То, что такая информация содержится в реальных частицах, занимающих реальные положения (координаты в пространстве), имеющих определенные спины и заряды, по Уилеру, похоже на то, как чертеж архитектора воплощается в построенном небоскребе. Фундаментальная информация отражена в чертеже, а небоскреб — это всего лишь реализация заложенной в проекте информации. С этой точки зрения Вселенную в процессе ее эволюции можно рассматривать как процессор или некоторый компьютер, обрабатывающий физическую информацию. Иными словами, все сущее (каждая частица, каждое силовое поле, даже сам пространственно-временной континуум) получает свою функцию и в конечном счете самое свое существование в каких-то ситуациях даже не напрямую, а из ответов на вопросы, которые извлекаются с помощью измерительных приборов. Сами же вопросы предполагают ответ "да" или "нет" (1 или 0), т. е. бинарные альтернативы из битов. "Всё из бита" символизирует идею, что всякий предмет и событие физического мира имеют в своей глубокой основе не материальные, а информационные источники и объяснение. Это нечто, что мы называем реальностью (а точнее, отражением реальности), вырастает в конечном счете из постановки вопросов "да" или "нет" и регистрации ответов на них с помощью аппаратуры. Это значит, что физические сущности и их свойства в своей основе являются информационно-теоретическими и физика все больше зависит от ИТ [11].

Впервые Вселенную как сеть взаимосвязанных компьютеров (или клеточный автомат) стал рассматривать К. Цузе, который в 1969 г. опубликовал книгу "Вычислительное пространство" (нем. *Rechnender Raum*), переведенную на английский язык [12]. Многие физики, развивая этот подход, рассматривают Вселенную уже как квантовый компьютер (КК) [13]. Так, в [13] утверждается, что каждый атом Вселенной, а не только различные макроскопические объекты, способен хранить информацию, и акты взаимодействия атомов можно описать как элементарные логические операции, в которых меняют свои значения уже не биты, а кубиты — элементарные единицы квантовой информации. Парадоксальный подход С. Ллойда [13] позволяет решить вопрос о постоянном усложнении Вселенной: даже случайная и очень короткая программа в ходе своего исполнения может дать крайне интересные результаты. Этот КК берет информацию, касающуюся положения и состояния вещей в настоящий момент времени  $t_0$ . Затем он порождает информацию, характеризующую положение и состояние вещей в следующий момент  $t_1$ , далее в последующий момент  $t_2$  и т. д.

Направление в физике "Все из бита" было продолжено учеником Уилера Я. Бекенштейном, а затем и в работах Г. т'Хофта и

Л. Сасскинда. Неожиданный результат опубликовал и С. Хокинг. Он показал, что энтропия черной дыры равна числу клеток планковского размера, необходимых для покрытия ее горизонта событий, как будто каждая клетка несет один бит, базовую единицу информации (Хокинг совсем не случайно использовал термин "энтропия". Напомним, что количество информации, приобретаемое при полном выяснении состояния физической системы, равно энтропии этой системы). У ученых при изучении поведения информации в таких экзотических объектах, как черные дыры, возник вопрос: теряется или сохраняется информация при падении вещества в черную дыру? Этот вопрос лежит в основе информационного парадокса, который приводит к внутренним противоречиям квантовой теории поля и общей теории относительности (ОТО) и очень беспокоит теоретиков, так как им никак не удастся совместить две математические платформы этих теорий [14]. Этот парадокс привлек большое внимание, поскольку его математика очень ясна, а последствия глобальны. По сути, информационный парадокс — отличная логическая загадка с огромной потенциальной пользой: решив ее, теоретикам удалось бы значительно продвинуться в области создания теории квантовой гравитации, а проблема создания такой теории является центральной проблемой современной физики.

Именно это и делает данную логическую загадку столь интересной. Вокруг нее развернулась дискуссия о сохранении информации и ее количестве в мире. Большинство физиков склонилось к тому, что существует закон сохранения информации и ее количества. В связи с этим можно подчеркнуть, что иногда у физиков не хватает математического аппарата для адекватного теоретического вывода этого закона в строгой математической форме. Но само возникновение информационного парадокса подтверждает прогноз Уилера о том, что в ближайшие десятилетия доминантной темой в физике будет информация, так как "Все из бита". Технологии развиваются огромными темпами, особенно в области ИТ и вычислительной техники (ВТ). Благодаря этому процесс познания окружающего мира с каждым годом выходит на новый уровень. Этот уровень в значительной степени связан с появлением первых коммерчески-доступных КК. Корпорация Google занялась созданием проблемно-ориентированного КК для моделирования такого гипотетического объекта, как червоточины (кротовые норы) [15]. Специалисты корпорации вместе с физиками хотят создать модель одной из таких систем, которая позволит проследить за информацией, проходящей через червоточину между двумя черными дырами. Червоточина представляется собой "тоннель" между двумя частями пространства-времени. Теоретическая возможность существования такой структуры описывается специальным решением уравнений поля

Эйнштейна. Однако до сих пор подтвердить существование червоточин не удалось. Моделирование червоточины с помощью КК, как считают астрофизики, может облегчить их поиски во Вселенной и таким образом подтвердить их существование.

В данной работе внимание уделено области ИТ и области *computer* и *control science*: что практически полезного можно извлечь из ЗСП и ЗСКИ в этих областях. Именно поэтому здесь формулируется и доказывается ЗСКИ, тесно связанный с ЗСП, который был выведен из дискретного аналога "физической" теоремы Нётер [6—9]. Практическим обоснованием ЗСП является созданный на его основе классический механизм гипермассового параллелизма, частным случаем которого является механизм квантового параллелизма. Механизм гипермассового параллелизма позволяет реализовать гипервычисления, которые иногда называют сверхтьюринговыми (более подробно см. в [11]). Поэтому здесь специально рассмотрена связь между ЗСП и ЗСКИ, так как в инженерной практике важно знать, какое количество информации получают в результате решения той или иной задачи с затратами времени и энергии, а также затратами на аппаратуру в форме механизма гипермассового параллелизма.

Можно обратить внимание физиков на то, что этот подход и математический аппарат, примененный здесь и в [6—9] для решения задач информатики, можно использовать и для решения физических задач при анализе движения, моделью которого служит дискретный лабиринт  $\Lambda$ . Уместно подчеркнуть, что ЗСП при использовании классических  $D$ -алгоритмов впервые применен для оценки времени при построении тестов, а тесты представляют собой реальные физические эксперименты над автоматами. Вспомним фразу Галилея о том, что природа — это книга, написанная на языке математики [16]. Не зная некоторых исчислений (т. е. не зная соответствующего языка математики), нельзя адекватно описать некоторые изучаемые явления. Вследствие этого физикам приходится изобретать необходимый язык математики, как, например, в случае с матричным вариантом квантовой механики В. Гейзенберга. Ньютон тоже не случайно создал дифференциальное исчисление. Оно было создано для строгого описания и решения физических задач (флюксии Ньютона — это производные  $\dot{x}$  по времени). В данной работе в качестве еще одного языка математики предлагается использовать классическое и матричное исчисление кубических комплексов, классические и квантовые  $D$ -алгоритмы (QD-алгоритмы) [17—20].

### Постановка задачи

ЗСП характеризует процесс перебора как движение в дискретном лабиринте  $\Lambda$  с точки зрения затрат времени, которое измеряется во

внесистемных временных дискретных единицах перебора (вдеп), и энергии, измеряемой также во внесистемных энергетических дискретных единицах перебора (эдеп) [6—9]. Процесс полного перебора выполняется классическими или квантовыми  $D$ -алгоритмами при решении прямой и обратной задачи — задачи  $\check{D}$  (от англ. *direct*) и задачи  $\check{I}$  (от англ. *inverse*). (Алгоритмы, выполняющие полный перебор, иногда называют алгоритмами грубой силы, "*brute force*"). Возможно, такое название возникло в результате использования криптографических атак в целях взлома некоторого зашифрованного документа). Задача  $\check{D}$  и задача  $\check{I}$  возникают в случае решения булевых уравнений, а также в случае задач построения тестов для КУ. Заметим, что построение тестов для КУ сводится к решению булевых уравнений, и наоборот, решение булевых уравнений сводится к построению тестов для эквивалентного КУ. Здесь рассматриваются только неизбыточные КУ и существенные одиночные константные неисправности (ОКН), обозначаемые символом " $\equiv \omega_j$ ". Неисправность  $\equiv \omega_j$  в  $j$ -й дуге КУ принимает значения 0 ( $\equiv \omega_j = \equiv 0_j$ ) либо 1 ( $\equiv \omega_j = \equiv 1_j$ ).

В соответствии с ЗСП величина временной сложности перебора  $Pr_{\check{D}}$  при решении задачи  $\check{D}$  равна величине временной сложности перебора  $Pr_{\check{I}}$  при решении задачи  $\check{I}$ , т. е.  $Pr_{\check{D}} = Pr_{\check{I}}$  [6—8]. При этом величины энергетических затрат (т. е.  $\check{E}_{\check{D}}$  и  $\check{E}_{\check{I}}$ ) в процессе полного перебора с использованием параллельно-последовательных  $D$ -алгоритмов в случае решения задачи  $\check{D}$  и задачи  $\check{I}$  могут быть не равны. Использование классических параллельно-последовательных  $D$ -алгоритмов предполагает применение классического механизма гипермассового параллелизма [6—8]. В этом случае энергетические затраты  $\check{E}_{\check{D}}$ , которые требуются для решения задачи  $\check{I}$ , намного больше энергетических затрат  $\check{E}_{\check{D}}$ , требующихся для решения задачи  $\check{D}$ :  $\check{E}_{\check{I}} \gg \check{E}_{\check{D}}$ . Но в *computer science* и в ИТ энергетические затраты на решение той или иной задачи часто неважны. Главное — это время решения задачи (т. е. временная сложность решения).

Возникает вопрос: на что расходуются время  $\Delta t_{\check{D}}$  и  $\Delta t_{\check{I}}$  (соответственно энергия  $\check{E}_{\check{D}}$  и  $\check{E}_{\check{I}}$ )? На этот вопрос существует единственно возможный ответ: время и энергия расходуются на получение информации в результате решения задачи  $\check{D}$  или задачи  $\check{I}$ . Но каково количество  $\check{I}_{\check{D}}$  информации, получаемой в результате решения задачи  $\check{D}$ , и каково количество  $\check{I}_{\check{I}}$  информации, получаемой в результате решения задачи  $\check{I}$ , когда их решение выполнено путем полного перебора с помощью  $D$ -алгоритмов? Как определить количество информации  $\check{I}_{\check{D}}$  и количество информации  $\check{I}_{\check{I}}$ ? Также важен вопрос:  $\check{I}_{\check{D}} = ? \check{I}_{\check{I}}$ . От-



веты на эти вопросы и составляют содержание постановки задачи, так как известно, что сообщения, отличающиеся формой записи, могут нести одинаковое количество информации об объекте, и наоборот, похожие (сходные, или толерантные) сообщения могут нести различное количество информации.

Два сообщения могут быть эквивалентными с точки зрения количества информации. Алгебраическим примером может служить такое сообщение, как уравнение  $y = x$ , которое при известном  $y$  однозначно определяет  $x$ . Точно также при известном  $y$  уравнение  $y = x^3$  однозначно определяет  $x$ . Формы записи выражений  $y = x$  и  $y = x^3$  различны, но они при известном  $y$  несут одинаковую информацию о величине  $x$ . Однако сходное сообщение в виде выражения  $y = x^2$  при тех же условиях такой однозначной информации не несет: если известно значение  $y$ , то в случае  $y = x^2$  значение  $x$  может быть либо положительным, либо отрицательным. Это значит, что при известном значении  $y$  выражения  $y = x$  и  $y = x^3$  с точки зрения количества информации эквивалентны, тогда как при известном значении  $y$  выражения  $y = x$  и  $y = x^2$  с точки зрения количества информации не эквивалентны: выражение  $y = x^2$  содержит больше неопределенности и, значит, несет меньшую информацию. Эти примеры показывают, что сообщения, различающиеся по форме записи, в одних случаях могут содержать одинаковое количество информации, а в других — разное. Поэтому важно определить, какое количество  $\tilde{I}_{\tilde{D}}$  информации будет получено в случае решения прямой задачи  $\tilde{D}$ , а какое количество  $\tilde{I}_{\tilde{I}}$  информации будет получено в случае решения обратной задачи  $\tilde{I}$ . Для построения тестов и для решения булевых уравнений могут быть использованы как классические параллельно-последовательные, так и  $QD$ -алгоритмы (при использовании квантовых  $D$ -алгоритмов возникают некоторые особенности, связанные с процессом измерения [18]). Их цель — получение ответа на поставленные вопросы, в частности определение величин  $\tilde{I}_{\tilde{D}}$  и  $\tilde{I}_{\tilde{I}}$ .

Формулировка задачи  $\tilde{D}$  такова: задано булево уравнение (или система таких уравнений). Также задан вектор  $\mathbf{X}_i = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ , где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — аргументы уравнения.

Например, заданы вектор  $\mathbf{X}_i = \langle 1011 \rangle$  и уравнение

$$(x_1 \vee x_2)' \oplus (x_3 \& x_4)' = 0. \quad (1)$$

Для сходного с (1) уравнения может быть использована следующая форма записи:

$$(x_1 \vee x_2)' \oplus (x_3 \& x_4)' = 1. \quad (2)$$

Для уравнения (1) либо уравнения (2) в случае задачи  $\tilde{D}$  требуется определить, является ли

вектор  $\mathbf{X}_i$  решением заданного булева уравнения либо не является. Кратким ответом может быть "да" либо "нет". Пусть  $\mathbf{X}_i = \langle 1011 \rangle$ . Подставим значения аргументов:

$$(1 \vee 0)' \oplus (1 \& 1)' = 0 \oplus 0 = 0.$$

Тогда  $\mathbf{X}_i = \langle 1011 \rangle$  является решением уравнения (1), но не является решением уравнения (2).

Отметим, что в случае решения задачи  $\tilde{D}$  каждый вектор  $\mathbf{X}_i$  при использовании  $D$ -алгоритмов имеет информационный вес (т. е. и для него можно вычислить определенное количество информации).

Задача  $\tilde{I}$  формулируется следующим образом: найти или построить с помощью классического  $D$ -алгоритма [7, 17] либо с помощью  $QD$ -алгоритма [18] вектор  $\mathbf{X}_i$ , который является решением заданного булева уравнения. Кратким ответом может быть "да", если удалось найти вектор  $\mathbf{X}_i$ , либо "нет", если не удалось. При использовании полного перебора ответ "нет" означает, что решения не существует. На рис. 1 приведено эквивалентное КУ для уравнения (1). Для уравнения (2) значение  $z_7$  на рис. 1 следует приравнять 1.

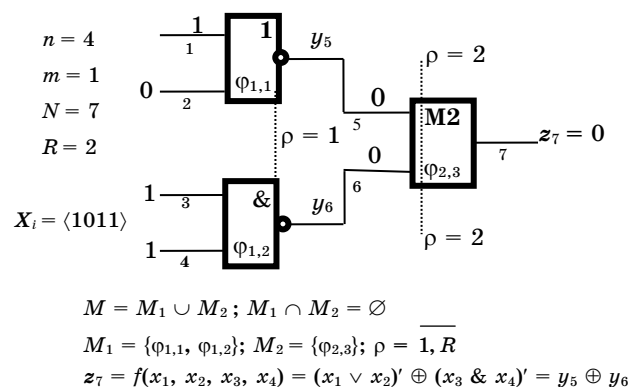


Рис. 1. Логическая сеть эквивалентного КУ

На рис. 1 символ  $n$  обозначает число аргументов в (1);  $m$  — число функций, реализуемых КУ (т. е. число выходов КУ);  $N$  — число дуг в логической сети КУ (часто логическую сеть КУ называют принципиальной схемой КУ или просто схемой);  $R$  — число рангов в логической сети КУ или в уравнении (1);  $\rho$  — номер ранга. Символ  $M$  обозначает множество логических элементов КУ ( $|M| = 3$ );  $M_1$  — множество элементов, отнесенных к рангу  $\rho = 1$ ;  $M_2$  — множество элементов, отнесенных к рангу  $\rho = 2$ .

Уравнение (1) с точки зрения построения тестов можно рассматривать как условие проявления и условие транспортировки сигнала  $\hat{S}$  о неисправности  $\equiv \omega_7 = \equiv 1_7$  в дуге 7 КУ ( $z_7 = 0$ ) [17, 19, с. 67, 230, 246]. Уравнение (2) можно рассматривать как условие проявления и условие транспортировки сигнала  $\hat{S}$  о неисправности  $\equiv \omega_7 = \equiv 0_7$  в дуге 7 ( $z_7 = 1$ ) того же КУ. Отметим,

что в обоих случаях неисправность  $\omega_j$  находится на выходе КУ (в дуге 7). Поэтому условие транспортировки в этом случае является выродившимся, так как существенный путь  $\pi_{=1,7}$  в случае (1) или существенный путь  $\pi_{=0,7}$  в случае (2), по сути, состоят из одной выходной дуги (контрольной точки) КУ. Отсюда (1) и (2) для неисправности  $\omega_j = 1$  либо  $\omega_j = 0$  являются одновременно условиями проявления и транспортировки.

Краткие формы ответа в виде "да" или "нет" в случае задачи  $\tilde{D}$  или задачи  $\tilde{I}$  являются крайне абстрактной формой решения задач  $\tilde{D}$  и  $\tilde{I}$  для (1) и (2). Для такой формы ответа требуется некий оракул, который может существовать только в воображении. Классические  $D$ -алгоритмы и  $QD$ -алгоритмы, решая  $\tilde{I}$  и  $\tilde{D}$  на классических и КК, дают более полный ответ, содержащий значительно большее количество  $\tilde{I}_{\tilde{D}}$  и большее количество  $\tilde{I}_{\tilde{I}}$ . Этот ответ в виде конечного куба  $C_q$  как решение задач  $\tilde{I}$  и  $\tilde{D}$  приводится далее. Здесь же в рамках постановки задачи уместно привести постулаты детерминизма.

*Постулат детерминированности для КУ.* КУ в исправном техническом состоянии и неисправное КУ с неисправностью  $\equiv \omega_j$  в дуге  $j$  (узле  $j$ ) КУ являются детерминированными устройствами.

Под детерминированным устройством понимается техническое изделие, которое в состоянии  $s$  при подаче на его входы вектора  $X_i$  или последовательности  $\Phi$  таких векторов ( $\Phi = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_t\}$ ) всегда выдает один и тот же выходной вектор  $Z_i$  или одну и ту же выходную последовательность  $\Psi$  ( $\Psi = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_t\}$ ). Постулат детерминированности для КУ говорит также о том, что ОКН  $\equiv \omega_j$  не выводит КУ из класса детерминированных устройств.

Известно также, что алгоритмы (в частности, алгоритмы построения тестов) могут быть стохастическими и детерминированными.

*Постулат детерминированности для  $D$ -алгоритмов.* Классические и квантовые  $D$ -алгоритмы являются детерминированными.

Иными словами, в случае решения обратной задачи  $\tilde{I}$  всякий полный  $D$ -алгоритм для заданного КУ и заданной неисправности  $\equiv \omega_j$  всегда построит один и тот же тест-вектор  $X_i$ , если такой тест-вектор существует. В случае решения прямой задачи  $\tilde{D}$  всякий полный  $D$ -алгоритм даст один и тот же ответ: либо "нет", либо "да" (если решение существует).

### Закон сохранения перебора

ЗСП, выведенный из дискретного аналога теоремы Нётер, обосновывает механизм гипермассового параллелизма, подогнанный для выполнения параллельно-последовательных  $D$ -алгоритмов и  $QD$ -алгоритмов [6—9, 20—22]. С появлением квантовых алгоритмов стало известно,

что механизм квантового параллелизма эффективно справляется с выполнением процесса полного перебора. Существует задача, которую КК решает за 200 с, тогда как суперкомпьютеру для ее решения понадобится 10000 лет вычислений. Еще на заре кибернетики, в 60-е годы XX века многие ученые в СССР предлагали решать многие задачи с помощью перебора, так как "перебор универсален" [23]. Однако тогда традиционные компьютеры не справлялись с полным перебором за приемлемое время. В связи с этим появилось большое количество эвристических алгоритмов, эффективно выполняющих сокращенный перебор для некоторых частных случаев решения различных математических задач. В общем случае эвристические алгоритмы не гарантируют нахождение решения, даже если такое решение существует. В 1968 г. академик А. Н. Колмогоров, не подозревая о возможности создания КК, вывел некоторые оценки сложности вычислений, в соответствии с которыми выполнение перебора в большом объеме находится за пределами возможностей любого будущего компьютера. Под компьютером он подразумевал традиционные классические компьютеры, существовавшие в то время. Для них А. Н. Колмогоров высказал прогноз: "Здесь мы сразу выходим за пределы возможностей сравнения путем простого перебора. Проблемы, которые не могут быть решены без большого перебора, останутся за пределами возможностей машины на сколь угодно высокой ступени развития техники и культуры" [24]. В 1968 г. будущие возможности КК никто не смог предугадать. В [25] показано, что в недалеком будущем КК, используя механизм квантового параллелизма в процессе решения сложных задач, сможет справиться с перебором даже в больших объемах, которые приводит А. Н. Колмогоров. Подчеркнем, что впервые возможность перебора в больших объемах с помощью КК показал американский математик П. Шор (P. Shor), разработавший квантовый алгоритм факторизации [26, 27]. При наличии КК с регистром, содержащим 1000 запутанных кубитов, используя алгоритм Шора, можно быстро "взломать" любой документ, зашифрованный алгоритмом RSA (по некоторым оценкам, приблизительно за 84 с). (Формально временная сложность алгоритма Шора (алгоритма факторизации сколь угодно больших целых чисел  $N$ ) при использовании  $L$  кубитов ( $L = O(\log N)$ ) оценивается как  $O(\log^3 N)$ ). Классические алгоритмы, решающие ту же задачу, имеют экспоненциальный класс сложности. Это имеет решающее значение с точки зрения криптографии [26, 27].) Для решения других задач можно выполнить полный перебор с помощью других квантовых алгоритмов, например  $QD$ -алгоритмов [20—22, 25]. Метод решения математических задач с использованием полного перебора является одним из самых древних. Одним из первых примеров алгоритмов перебора может

служить алгоритм факторизации в виде решета Эратосфена для поиска простых чисел. Это "решето" было известно в III в. до н. э. Возрождением интереса к полному перебору мы обязаны П. Шору, и он связан с появлением КК и квантовых алгоритмов.

$QD$ -алгоритмы, функционирующие на платформе проблемно-ориентированного КК, используют квантовый параллелизм на основе ЗСП, что позволяет решать  $NP$ -полные задачи за полиномиальное время [7, 18]. Таким образом, механизм гипермассового параллелизма, обоснованный ЗСП, ломают стереотипы многих современных математиков, считающих, что в случае решения, например, булевых уравнений время  $\Delta t_D$  решения задачи  $\tilde{D}$  меньше времени  $\Delta t_I$  решения задачи  $\tilde{I}$ . Заметим, что при использовании компьютеров величина перебора определяется как временная сложность (т. е. как время  $\Delta t_D$  или время  $\Delta t_I$ ). Многие математики считают, что величина  $Pr_D$  перебора при решении задачи  $\tilde{D}$  меньше, чем величина  $Pr_I$  перебора при решении задачи  $\tilde{I}$ . Однако в [7, 18] доказано, что при использовании классических или  $QD$ -алгоритмов с учетом принятых обозначений выражение для ЗСП достаточно просто:

$$Pr_D = Pr_I = Pr = \Delta t_D = \Delta t_I = \Delta t = R \text{ (вдеп)}. \quad (3)$$

В (1) вдеп обозначает упомянутую уже внешнюю временную дискретную единицу перебора: 1 вдеп равна времени выполнения одной элементарной операции пересечения (операции  $\alpha_i$ ) в  $D$ -алгоритмах [6—9]. Символ  $R$  обозначает число рангов в булевом уравнении или число рангов в эквивалентном комбинационном устройстве (КУ) (см. рис. 1).

#### Сохранение информации и ее количества в результате решения задачи $\tilde{D}$ и задачи $\tilde{I}$

Напомним, что под информацией понимают сведения, воспринимаемые человеком или специальным устройством как отражение фактов материального или духовного мира в процессе коммуникации (Существует международный стандарт, определяющий понятие "информация". В соответствии с ним информация — это знания о предметах, фактах, идеях и т. д., которыми могут обмениваться люди в рамках конкретного контекста (стандарт ISO/IEC 10746-2:1996).) Количество информации — это теоретико-информационная мера величины информации, содержащейся в одной случайной величине относительно другой [28, с. 245]. В данной работе рассматривается только дискретная информация. Под обработкой такой информации понимается выполнение любого алгоритма, исходные данные для которого отождествляются с состоянием носителя информации, а результат — с состоянием того же или другого носителя. В нашем случае это могут быть как классические, так и  $QD$ -алгоритмы.

Напомним одну из предельных теорем теории вероятностей — теорему Бернулли [29, с. 36 и 295]. Эта теорема является простейшей формой закона больших чисел: "Согласно теореме Бернулли при большом числе  $\tilde{N}$  опытов событие  $\beta$ , заключающееся в том, что разность  $\delta$  между частотой  $w_\alpha$  события  $\alpha$  и его вероятностью  $p_\alpha$ , сколь угодно мала, становится практически достоверным". Заметим, что частоту  $w_\alpha$  часто называют статистической вероятностью в отличие от математической вероятности, которую можно определить без опыта, например на основе симметрии. Это возможно для симметричного кубика игральной кости: если событие  $\alpha$  — это выпадение одной из цифр (например, цифры 5) на грани кубика, то математическая вероятность  $p_\alpha = p_5 = 1/6$ . С другой стороны, в соответствии с теоремой Бернулли, при большом числе  $\tilde{N}$  опытов с игральной костью цифры от 1 до 6 выпадают с частотой  $w_\alpha$ , близкой к математической вероятности  $p_\alpha = w_\alpha = 1/6$ , т. е. с увеличением числа  $\tilde{N}$  для кубика  $|\delta| = |p_\alpha - w_\alpha| \rightarrow 0$ . Иными словами, можно считать, что  $p_\alpha = w_\alpha$ . Ранее при формулировании ЗСП, рассматривались классические и  $QD$ -алгоритмы, основанные на классическом и матричном исчислении кубических комплексов [17—20]. Очевидно, что если значения в координатах конечного куба  $C_Q$  для эквивалентного КУ (т. е. значения в дугах КУ) будут известны заранее, то нет смысла решать прямую или обратную задачу для заданного булева уравнения. Напомним, что куб  $C_Q$  является конечным решением задачи  $\tilde{D}$  или  $\tilde{I}$ . Поэтому исходный куб  $C_0$  рассматривается как некоторый математический объект, у которого содержимое в каждой координате после решения задачи может случайным образом (*априори* в силу незнания результата решения в начале процесса решения)\* принять некоторое значение, закодированное тем или иным символом из алфавита  $A$  ( $A = \{0, 1, \sim, \emptyset\}$ )\*\*.

\* Если используется генератор случайных или псевдослучайных чисел (ГСЧ или ГПСЧ) для генерирования векторов  $X_i$  из области определения функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , которая записана в левой части булева уравнения (см., например, уравнения (1) и (2) и рис. 1). Тогда каждый вектор  $X_i$  можно рассматривать как входной набор для эквивалентного КУ. Если подать этот сгенерированный с помощью ГСЧ набор  $X_i$  на входы этого КУ, то в его узлах (дугах логической сети) будут возникать некоторые значения. Эти значения в дугах логической сети во многом аналогичны числам от 1 до 6 на гранях игральной кости. Здесь необходимо подчеркнуть, что все известные классические и  $QD$ -алгоритмы являются детерминированными. До решения задачи  $\tilde{D}$  или задачи  $\tilde{I}$  не имеется информации о значениях в координатах конечного куба  $C_Q$ . Поэтому в каждой координате исходного куба  $C_0$  записано неопределенное значение, т. е. символ " $\sim$ ".

\*\* Алфавит  $A = \{0, 1, \sim, \emptyset\}$  является неполным алфавитом Д-исчисления, но его вполне достаточно для решения булевых уравнений, в частности SAT-проблемы. В конечном кубе  $C_Q$  в случае успешного решения задачи  $\tilde{D}$  или  $\tilde{I}$  символ  $\emptyset$  не появляется. Если в кубе  $C_Q$  появляется символ  $\emptyset$ , то это означает, что решения не существует.

Это и означает, что конечному кубу  $C_q$  заведомо присуща степень неопределенности. Очевидно, что информация, полученная о значениях в координатах куба, будет тем ценнее и содержательнее, чем больше была неопределенность до получения этой информации.

Известно, что информация о состоянии некоторого объекта или системы определяется уменьшением неопределенности этого состояния. Мерой неопределенности состояния является энтропия. Количество информации измеряется уменьшением энтропии той системы  $S$  (или объекта  $S$ ), для уточнения состояния которой предназначены сведения [29]. Поэтому количество  $\tilde{I}_{C_q}$  информации для конечного куба  $C_q$  — результата решения задачи  $\tilde{D}$  или задачи  $\tilde{I}$  с помощью  $D$ -алгоритма — определяются выражением [29]

$$\tilde{I}_{C_q} = \sum_{j=1}^N \eta(p_j), \quad (4)$$

где  $\eta(p_j) = -p_j \log_2 p_j$  — вспомогательная функция.

В процессе решения задачи  $\tilde{D}$  или задачи  $\tilde{I}$  с помощью параллельно-последовательного  $D$ -алгоритма или  $QD$ -алгоритма по мере заполнения значений в кубе  $C_q$  на каждом шаге  $q$   $D$ -алгоритма количество информации будет возрастать, т. е. прирост  $\Delta \tilde{I}_{\tilde{D}_q} \neq 0$  ( $\Delta \tilde{I}_{\tilde{I}_q} \neq 0$ ). После выполнения последнего шага  $Q$  все координаты куба  $C_q$  будут полностью заполнены. В этом случае ЗСКИ формулируется как  $\tilde{I}_{\tilde{D}} = \tilde{I}_{\tilde{I}} = \tilde{I}$ .

Это будет доказано далее. Здесь для иллюстрации уместно привести исходный куб  $C_0$  для уравнений (1) и (2), а также для эквивалентного

КУ (см. рис. 1) при использовании последовательного  $D$ -алгоритма Рота [17]:

$$C_0 \quad \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \sim & \sim & \sim & \sim & \sim & \sim & \sim \end{matrix}. \quad (5)$$

В случае уравнения (1) куб  $C_0$  для задачи  $\tilde{I}$  можно записать в виде

$$C_0 \quad \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \sim & \sim & \sim & \sim & \sim & \sim & 0 \end{matrix}. \quad (6)$$

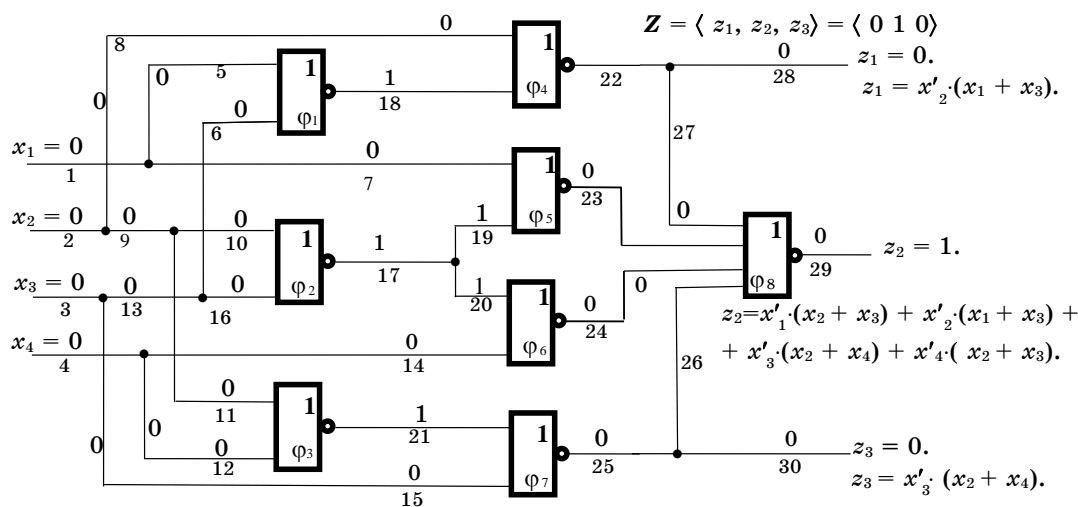
В случае уравнения (2) куб  $C_0$  для задачи  $\tilde{I}$  можно записать в виде:

$$C_0 \quad \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \sim & \sim & \sim & \sim & \sim & \sim & 1 \end{matrix}. \quad (7)$$

### Исправная схема Шнейдера

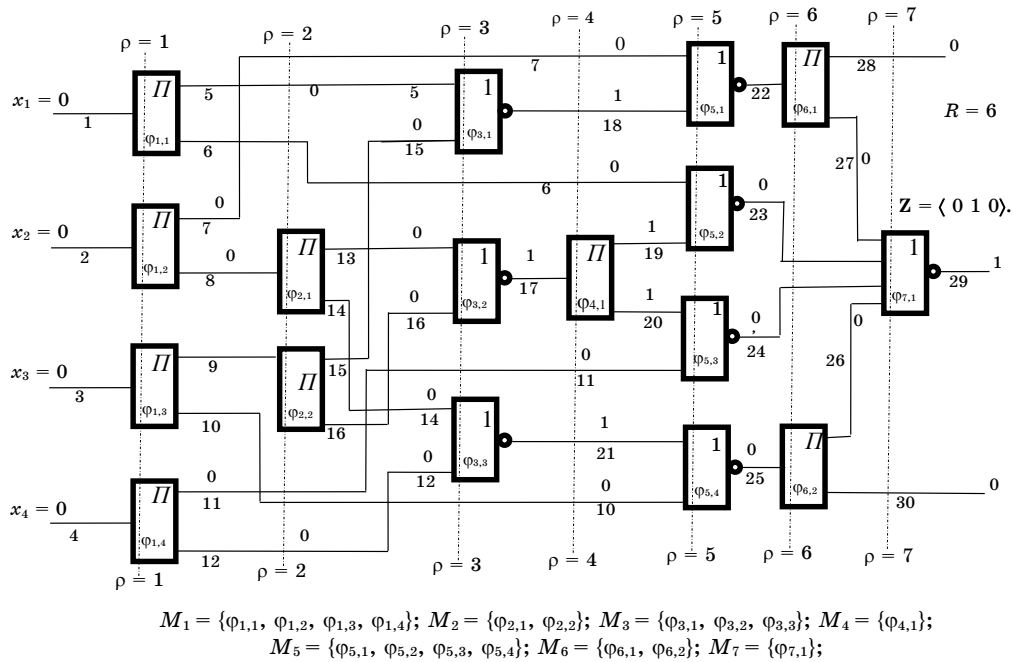
Впервые схему рассматриваемого эквивалентного КУ предложил П. Р. Шнейдер (*P. R. Schneider*) из IBM [30] (см. также [19, с. 220—221]). На рис. 2 приведен оригинал исправной схемы (КУ) Шнейдера, построенной из 8 элементов ИЛИ-НЕ (NOR). Для схемы Шнейдера (рис. 2 и 3)  $n = 4$ . Следовательно, область определения 3 функций (т. е.  $\text{dom } X$ ), реализуемая этой схемой, содержит  $2^4 = 16$  векторов  $X_i$ :  $\text{dom } X = \{X_1, X_2, \dots, X_{16}\}$ .  $\text{dom } X = \{\langle 0000 \rangle, \langle 0001 \rangle, \dots, \langle 1111 \rangle\}$ . Для схемы Шнейдера длина  $m$  выходного вектора равна 3 ( $m = 3$ ), т. е. выходной вектор  $Z = \langle z_1, z_2, z_3 \rangle$  (выходы 28, 29, 30).

На рис. 3 приведен модифицированный вариант этого КУ. Для разветвлений вместо жирных точек используется элемент "П" ("повторитель" или "разветвитель" — FANOUT), а также осуществлено ранжирование.



Входной вектор  $X_1 = \langle 0000 \rangle$ ; реакция исправной схемы Шнейдера:  $Z_1 = \langle 010 \rangle$ .

Рис. 2. Моделирование исправной схемы Шнейдера, когда на ее входы подан вектор  $X_1 = \langle 0000 \rangle$



$X_1 = \langle 0000 \rangle$ ; для исправного КУ:  $Z_1 = \langle 010 \rangle$ . Для КУ с неисправностью  $\omega_{17} = \equiv 0_{17}$ :  $Z_1 = \langle 010 \rangle$

Рис. 3. Моделирование исправной схемы Шнейдера, когда на ее входы подан набор  $X_1 = \langle 0000 \rangle$

Схема Шнейдера, по сути, одновременно реализует 3 булевых функции:  $f_1 = z_1(x_1, x_2, x_3)$ ,  $f_2 = z_2(x_1, x_2, x_3, x_4)$  и  $f_3 = z_3(x_2, x_3, x_4)$ ;

$$\begin{cases} z_1 = x'_2(x_1 + x_3); \\ z_2 = x'_1(x_2 + x_3) + x'_2(x_1 \vee x_3) + \\ + x'_3(x_2 + x_4) \vee x'_4(x_2 + x_3); \\ z_3 = x'_3(x_2 + x_4). \end{cases} \quad (8)$$

Таблица исправленной схемы Шнейдера показывает, что логическую сеть КУ можно рассматривать как некий гиперкуб с 16 гранями.

На каждой грани такого гиперкуба записано двоичное число в виде строки из таблицы (~ от 1 по 30 клетку). В каждом опыте, т. е. при каждом броске этого гиперкуба, он может падать одной гранью вверх, как кубик игральной кости. Тогда математическая вероятность выпадения каждого двоичного числа исходя из симметрии гиперкуба равна 1/16. То же самое можно получить, если генерировать входной вектор  $X_i \in \text{dom } X$  с помощью ГСЧ.

В системе булевых уравнений (6) символ логического умножения "." соответствует символу конъюнкции &, а символ логического сложения "+" — символу дизъюнкции  $\vee$  [31].

Таблица моделирования исправной схемы Шнейдера

$\mathbf{N_i}$	$\mathbf{X_i}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	$\mathbf{Z_i}$	
1	$\langle 0000 \rangle$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	$\langle 010 \rangle$	
2	$\langle 0001 \rangle$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	$\langle 001 \rangle$	
3	$\langle 0010 \rangle$	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	$\langle 100 \rangle$	
4	$\langle 0011 \rangle$	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	$\langle 100 \rangle$	
5	$\langle 0100 \rangle$	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	$\langle 001 \rangle$	
6	$\langle 0101 \rangle$	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	$\langle 001 \rangle$	
7	$\langle 0110 \rangle$	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	$\langle 000 \rangle$	
8	$\langle 0111 \rangle$	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	$\langle 000 \rangle$	
9	$\langle 1000 \rangle$	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	$\langle 100 \rangle$	
10	$\langle 1001 \rangle$	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	$\langle 101 \rangle$	
11	$\langle 1010 \rangle$	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	$\langle 100 \rangle$
12	$\langle 1011 \rangle$	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	$\langle 100 \rangle$
13	$\langle 1100 \rangle$	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	$\langle 001 \rangle$	
14	$\langle 1101 \rangle$	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	$\langle 001 \rangle$	
15	$\langle 1110 \rangle$	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$\langle 000 \rangle$	
16	$\langle 1111 \rangle$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	$\langle 010 \rangle$	



## Литература

1. Гомоюнов К. К., Кесаманлы М. Ф., Кесаманлы Ф. П., Сурыгин А. И. Физика / под ред. Гомоюнова К. К., Козлова В. Н. Изд. перераб. и доп. — М.: Проспект, 2010. — 496 с.
2. Трефил Д. 200 законов мироздания. — М.: Гелеос, 2007. — 744 с. ISBN 978-5-8189-0820-5.
3. Popov G., Mladenov V., Mastorakis N. Calculation of the acceleration of parallel programs as a function of the number of threads [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228569958\\_Calculation\\_of\\_the\\_acceleration\\_of\\_parallel\\_programs\\_as\\_a\\_function\\_of\\_the\\_number\\_of\\_threads](https://www.researchgate.net/publication/228569958_Calculation_of_the_acceleration_of_parallel_programs_as_a_function_of_the_number_of_threads) (дата обращения: 14.04.2019).
4. Quinn M. J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. — NY: McGraw-Hill, 2004.
5. Agerwala T., Gupta M. Systems Research challenges: A scale-out perspective // IBM J. RES. & DEV. 2006. V. 50. № 2/3 (MARCH/MAY). P. 173—180.
6. Правильщиков П. А. Симметрия диагностического лабиринта и закон сохранения перебора // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 1996. № 3. С. 38—52.
7. Правильщиков П. А. Закон сохранения перебора и естественный параллелизм D-алгоритмов для построения тестов и моделирования в технической диагностике // Автоматика и телемеханика. 2004. № 7. С. 156—199.
8. Правильщиков П. А. "Физическая" теорема Нетер в фотонике и computer science" (Ч. I) // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 144—154.
9. Правильщиков П. А. "Физическая" теорема Нетер в фотонике и computer science" (Ч. II) // Прикладная физика. 2006. № 1. С. 95—109.
10. Wheeler John A. Information, physics, quantum: The search for links: Complexity, Entropy, and the Physics of Information. — Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1990.
11. Правильщиков П. А. Гипервычисления и фундаментальные научные исследования: Пленарный доклад в тр. 9-й Межд. конф. CAD/ CAM / PDM — 2009. — Институт проблем управления РАН им. В. А. Трапезникова. С. 7—12. ISBN 978-5-91450-047-1.
12. Zuse K. Calculating Space. — Cambridge, Mass: MIT Technical Translation AZT-70-164-GEMIT, Massachusetts Institute of Technology (Project MAC), 1970. 02139 (англ.).
13. Ллойд С. Программируя Вселенную: Квантовый компьютер и будущее науки / Пер. с англ. — М.: Альпина нон-фикшн, 2013. — 256 с.
14. Хоссенфельдер С. Почему физики так переживают из-за парадокса исчезновения информации в черной дыре / Пер. с англ. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/403197/>
15. Google создаст квантовый компьютер для моделирования червоточины [Электронный ресурс]. URL: [https://yandex.ru/news/story/Google\\_sozdast\\_kvantovyy\\_kompyuter\\_dlya\\_modelirovaniya\\_chervotchiny--4efabaa9058c164f27494ab805111c39?lr=213&lang=ru&std=UKY6&persistent\\_id=79516721&rubric=personal\\_feed&from=story](https://yandex.ru/news/story/Google_sozdast_kvantovyy_kompyuter_dlya_modelirovaniya_chervotchiny--4efabaa9058c164f27494ab805111c39?lr=213&lang=ru&std=UKY6&persistent_id=79516721&rubric=personal_feed&from=story)
16. Тегмарк М. Наша математическая Вселенная. В поисках фундаментальной природы реальности. — М.: АСТ: CORPUS, 2017. — 592 с.
17. Roth J. P. Diagnosis of automata failures: a calculus and method // IBM J. Research and Development. 1966. № 7 (July). P. 18—32.
18. Правильщиков П. А. Квантовое решение булевых уравнений и проблема  $P = ? NP$  // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 1. С. 50—64.
19. Карибский В. В., Пархоменко П. П., Согомонян Е. С., Халчев В. Ф. Основы технической диагностики. Кн. 1. — М.: Энергия, 1976. — 346 с.
20. Правильщиков П. А. Новая квантовая математика: матричное исчисление кубических комплексов и квантовые D-алгоритмы // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 2. С. 21—32.
21. Правильщиков П. А. Квантовый параллелизм и новая модель вычислений: тр. 12-го Всероссийско-го совещания по проблемам управления — ВСПУ-2014. — М.: Институт проблем управления им. Трапезникова РАН, 2014. С. 7319—7334.
22. Правильщиков П. А. Новый механизм квантового параллелизма и его физические и математические основания // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4. С. 15—26.
23. Пospelов Д. А. Фантазия или наука. — М.: Физматлит, 1982. — 224 с.
24. Колмогоров А. Н. Автоматы и жизнь: Кибернетика ожидаемая и кибернетика неожиданная (сб. статей) / под ред. Берга А. И., Э. Кольмана. — М.: Наука, 1968. С. 12—31.
25. Правильщиков П. А. Квантовое превосходство и решение алгебраических уравнений // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 3. С. 49—60.
26. Shor P. Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring // Foundations of Computer Science, 1994 Proceedings., 35th Annual Symposium on — IEEE, 1994. P. 124—134. doi:10.1109/SFCS.1994.365700.
27. Алгоритм Шора [Электронный ресурс]. URL: [https://howlingpixel.com/i-ru/%D0%90%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC\\_%D0%A8%D0%BE%D1%80%D0%B0](https://howlingpixel.com/i-ru/%D0%90%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC_%D0%A8%D0%BE%D1%80%D0%B0) (дата обращения: 08.09.2019).
28. Математический энциклопедический словарь / гл. редактор Прохоров Ю. В. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — 847 с.
29. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1964. — 576 с.
30. Schneider P. R. On the necessity to examine D-chains in diagnostic test generation — an example // IBM Journal research and development. 1967. № 1. P. 114.
31. Гириберг В. В., Доманицкий С. М., Кутлер Н. П., Петрухин В. П., Прангшвили И. В., Ходнев В. В. Типовые узлы на полупроводниковых логических и функциональных элементах серии ЭТ. — М.-Л.: Энергия, 1966. — 144 с.

## CONSERVATION LAWS IN COMPUTER SCIENCE

P. A. Pravilshchikov

Federal State Government-Financed Scientific Establishment V. A. Trapeznikov  
Institute for Control Sciences of the RAS, Moscow, Russia

*The process of solving complex problems in computer science and in information technology as a specific form of motion in a discrete maze is considered. This form of movement is characterized by laws, in particular, laws of conservation. Previously, from the discrete analogue of the well-known "physical" theorem of Noether was derived as consequence in form of the enumeration conservation law (ECL). It is shown here that the process of solving some problems in computer science is also characterized by the conservation law of amount of information (CLAI), closely related to the ECL.*

**Keywords:** brute force, information quantity, brute force conservation law, information quantity conservation law, quantum computers, classical and quantum D-algorithms.

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

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2019 г.

УДК 519.63

## РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИНТЕРПОЛЯНТОВ

О. А. Шевчук; Е. В. Конопацкий, канд. техн. наук  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
г. Макеевка, Донецкая Народная Республика

*Предложен подход к аппроксимации решения дифференциальных уравнений с помощью геометрических интерполянтов. Рассмотрено применение указанного метода для численного решения дифференциальных уравнений с одной, двумя, тремя и четырьмя независимыми переменными. Для каждого случая предложен вычислительный алгоритм решения. Установлено, что при увеличении количества переменных вычислительный алгоритм остается неизменным, увеличивается лишь размерность геометрического интерполянта и количество уравнений покоординатного расчета.*

**Ключевые слова:** геометрический интерполянт, аппроксимация, дифференциальные уравнения, численное решение.

Инженерные исследования динамики процессов, протекающих в механизмах, реакторах, локальных системах стабилизации параметров технологических процессов, трубопроводах, теплообменниках и других инженерных объектах, приводят к дифференциальным уравнениям (ДУ). По количеству независимых переменных их делят на обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) и уравнения в частных производных (ДУЧП) [1, 2]. Затем уравнения классифицируют по наибольшему порядку производной. Важность классификации ДУ обусловлена тем, что для каждого вида существуют своя общая теория и методы решения уравнений.

Все методы решения ДУ условно можно разбить на аналитические и численные [3, 4]. Применение аналитических методов решения ОДУ позволяет выразить решение через элементарные функции или представить его при помощи квадратур от элементарных функций. Эти методы точны, однако чтобы решить ДУ, необходимо знать вид дифференциального уравнения и способ его решения. Для нахождения аналитического решения ДУЧП используют методы, которые разработаны для различных типов уравнений и в некоторых простых случаях позволяют получить решение в виде некоторой формулы или сходящегося ряда.

Нахождение аналитического решения даже простого уравнения в сложной области не всегда возможно, поэтому для решения подобных уравнений разработано множество численных методов. Для решения ОДУ достаточно часто используют такие методы, как методы Эйлера, Гюна, Рунге—Кутты, Адамса, метод прогноза и коррекции и т. д. [4, 5]. Для решения задач, описываемых уравнениями в частных производных, применимы разностные методы (конечных разностей, конечных элементов, конечных объемов), методы, основанные на аппроксимации дифференциального оператора некоторыми выражениями, методы сведения решения ДУЧП к вариационной задаче [6, 7]. При этом каждо-

му методу свойственны свои особенности и свои классы решаемых задач.

### Аппроксимация решения дифференциальных уравнений с помощью геометрических интерполянтов

Как уже было отмечено, ДУ обладают широким разнообразием видов и далеко не для каждого существует точное решение. С точки зрения геометрической интерпретации для решения ДУ необходимо смоделировать некоторый геометрический объект, обладающий требуемыми дифференциальными характеристиками [8, 9]. Для численного решения ДУ достаточно, чтобы требуемые дифференциальные характеристики были обеспечены в некоторых дискретных точках (узлах сети), принадлежащих моделируемому геометрическому объекту. При этом промежуточные значения полученного решения будут определяться с помощью многомерной интерполяции. Тогда для аппроксимации решения ДУ удобно сразу использовать один из геометрических интерполянтов.

Под геометрическим интерполянтом понимают параметризованный геометрический объект, проходящий через набор заданных точек. Координаты этих точек соответствуют исходной экспериментально-статистической информации или обладают необходимыми наперед заданными свойствами.

Для решения уравнений математической физики [10] выбор геометрического интерполянта зависит в первую очередь от размерности пространства лапласиана.

В классической литературе [5, 11] оператор Лапласа — дифференциальный оператор действующий в линейном пространстве гладких функций и обозначаемый символом  $\Delta$ . В  $n$ -мерном пространстве этот оператор функции  $U$  ставит в соответствие функцию

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2}{\partial x_n^2} \right) U.$$

Трехмерным оператором Лапласа называют выражение

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2},$$

где  $U$  — функция трех переменных  $x, y, z$ ; если функция  $U$  зависит только от двух переменных, то оператор Лапласа

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$$

называют двумерным.

Без нарушения общности будем называть  $n$ -номерным оператором Лапласа вторую производную функции  $\frac{d^2 U}{dx^2}$ , если функция  $U$  зависит только от одной переменной  $x$ , и лапласианом нулевого порядка (или размерности 0) первую производную  $\frac{dU}{dx}$ .

В зависимости от размерности лапласиана для аппроксимации решения ДУ выбирают соответствующий тип интерполянта, который описывает аппроксимируемый объект. Указанную классификацию можно представить в виде таблицы.

Классификация решений ДУ по размерности лапласиана

Размерность лапласиана	Тип геометрического интерполянта	Вид аппроксимирующего объекта
0	1-параметрический $U = f(x)$	Кривая в $R^2$
1	2-параметрический $U = f(x, t)$	Поверхность в $R^3$
2	3-параметрический $U = f(x, y, t)$	Гиперповерхность в $R^4$
3	4-параметрический $U = f(x, y, z, t)$	Гиперповерхность в $R^5$
...	...	...
$n$	$(n+1)$ -параметрический $U = f(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$	Гиперповерхность в $R^{n+2}$

### Численное решение дифференциальных уравнений с помощью 1-параметрических геометрических интерполянтов

Рассмотрим уравнение вида

$$F\left(x, U, \frac{dU}{dx}\right) = 0. \quad (1)$$

В данном уравнении размерность лапласиана равна 0. Следовательно, для аппроксимации решения выбираем 1-параметрический интерполянт.

В соответствии с геометрической теорией многомерной интерполяции [12–14] геометрический интерполянт формируем путем аналитического описания дерева геометрической модели.

Для 1-параметрического интерполянта дерево геометрической модели представляет собой линию, проходящую через наперед заданные точки.

В БН-исчислении [15, 16] такой интерполянт можно представить в виде следующего точечного уравнения 1-параметрического множества точек:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i p_i(u),$$

где  $M$  — текущая точка дуги кривой линии, проходящей через наперед заданные точки;

$M_i$  — исходные точки, через которые должна проходить дуга кривой;

$p_i(u)$  — функции параметра  $u$ ;

$u$  — текущий параметр, который изменяется от 0 до 1;

$n$  — количество исходных точек дуги кривой линии;

$i$  — порядковый номер исходной точки.

Обязательным является условие принадлежности однопараметрического множества пространству выбранной размерности:  $\sum_{i=1}^n p_i(u) = 1$ .

Выполнение этого условия обеспечивается использованием специальных алгебраических кривых, полученных на основе полинома Бернштейна [17], и является обязательным для всех последующих интерполянтов.

Выполнив по координатный расчет для двумерного пространства, получим систему одно-типовых параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^n x_i p_i(u); \\ U = \sum_{i=1}^n U_i p_i(u). \end{cases} \quad (2)$$

Изначально в метод определения дуги кривой, проходящей через наперед заданные точки [17], заложено равномерное распределение параметра. С учетом этого справедлива линейная зависимость между значением  $x$  и текущим параметром:

$$x = \tilde{n} l u + b, \quad (3)$$

где  $\tilde{n}$  — порядок дуги кривой;

$l$  — шаг равномерного распределения точек;

$b$  — начальное значение  $x$ .

В результате зависимость (4) принимает вид

$$\begin{cases} x = a u + b; \\ U = \sum_{i=1}^n U_i p_i(u), \end{cases} \quad (4)$$

где  $a = \tilde{n} l$ .

Далее, учитывая линейную зависимость первого уравнения системы (4), перейдем к уравнению, заданному в явном виде:  $U = f(x)$ . Продифференцируем его в соответствии с уравнением (1). Подставим поочередно значения параметров в узловые точки интерполянта и составим СЛАУ, решив которую, получим искомое численное решение уравнения (1).

#### Численное решение дифференциальных уравнений с помощью 2-параметрических геометрических интерполянтов

Рассмотрим использование предложенного метода для решения уравнений вида

$$F\left(x, U, \frac{dU}{dx}, \frac{d^2U}{dx^2}\right) = 0. \quad (5)$$

Для аппроксимации решения уравнения (5) воспользуемся 2-параметрическим геометрическим интерполянтом, т. к. в уравнении присут-

ствует одномерный лапласиан  $\frac{d^2U}{dx^2}$ .

Двумерный геометрический интерполянт определен 2-параметрическим множеством точек — поверхностью в  $R^3$ , проходящей через наперед заданные точки.

Вычислительный алгоритм определения 2-параметрического геометрического интерполянта можно представить в виде следующей последовательности точечных уравнений, которые включают  $m$  1-параметрических интерполянтов на стадии формирования дерева геометрической модели:

$$\begin{cases} M_1 = \sum_{j=1}^n M_{1j} p_{1j}(u); \\ \dots; \\ M_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} p_{ij}(u); \\ \dots; \\ M_m = \sum_{j=1}^n M_{mj} p_{mj}(u); \\ M = \sum_{i=1}^m M_i q_i(v), \end{cases} \quad (6)$$

где  $p_{ij}(u)$  — функции параметра  $u$ ;  
 $q_i(v)$  — функции параметра  $v$ .

Выполним покоординатный расчет последовательности уравнений (6) для 3-мерного пространства. Для этого примем декартову систему координат с осями  $x$ ,  $t$  и  $U$ . Таким образом, количество уравнений последовательности (6) утроится. С учетом особых свойств дуг описан-

ных алгебраических кривых, полученных на основе полиномов Бернштейна, получим

$$\begin{cases} t = a_t u + b_t; \\ x = a_x v + b_x; \\ U = \sum_{i=1}^m U_i q_i(v), \end{cases} \quad (7)$$

где  $U_i = \sum_{j=1}^n U_{ij} p_{ij}(u)$ ;

$a_t, a_x, b_t, b_x$  — параметры, которые определяют по аналогии с (3).

Используя линейную зависимость первых двух уравнений системы (7), перейдем к уравнению, заданному в явном виде:  $U = f(x, t)$ . Продифференцируем его в соответствии с уравнением (5). Подставляя поочередно значения параметров в узловые точки интерполянта, составим СЛАУ, решив которую, получим искомое численное решение уравнения (5).

#### Численное решение дифференциальных уравнений с помощью 3-параметрических геометрических интерполянтов

Рассмотрим уравнение вида

$$F\left(x, y, U, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right) = 0. \quad (8)$$

В качестве геометрического интерполянта выберем 3-параметрическое множество точек — гиперповерхность 4-мерного пространства, проходящую через наперед заданные точки.

Вычислительный алгоритм определения 3-параметрического интерполянта включает  $m$  2-параметрических интерполянтов, формирующих дерево геометрической модели:

$$\begin{cases} M_{ij} = \sum_{k=1}^l M_{ijk} p_{ijk}(u); \\ \dots; \\ M_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} q_{ij}(v); \\ \dots; \\ M = \sum_{i=1}^m M_i r_i(w), \end{cases} \quad (9)$$

где  $p_{ijk}(u)$  — функции параметра  $u$ ;  
 $q_{ij}(v)$  — функции параметра  $v$ ;  
 $r_i(w)$  — функции параметра  $w$ .

Выполним покоординатный расчет последовательности уравнений (9) для 4-мерного пространства. Для этого примем декартову систему координат с осями  $x$ ,  $y$ ,  $t$  и  $U$ . С учетом особых

свойств дуг алгебраических кривых, полученных на основе полиномов Бернштейна, получим

$$\begin{cases} t = a_t u + b_t; \\ x = a_x v + b_x; \\ y = a_y w + b_y; \\ U = \sum_{i=1}^m U_i r_i(w), \end{cases} \quad (10)$$

где  $U_i = \sum_{j=1}^n U_{ij} q_{ij}(v)$ ,  $U_{ij} = \sum_{k=1}^l U_{ijk} p_{ijk}(u)$ ;

$a_t, a_x, a_y, b_t, b_x, b_y$  — параметры, определяемые по аналогии с (3).

Поскольку первые три уравнения системы (10) линейно зависят от параметров, перейдем к уравнению, заданному в явном виде:  $U = f(x, y, t)$ . Продифференцируем его в соответствии с уравнением (8). Подставляя поочередно значения параметров в узловые точки интерполянта, составим СЛАУ, решив которую, получим искомое численное решение уравнения (8).

#### Численное решение дифференциальных уравнений с помощью 4-параметрических геометрических интерполянтов

Рассмотрим уравнение второго порядка с тремя независимыми переменными, заданное в неявном виде:

$$F \left( x, y, z, U, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z}, \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial y}, \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (11)$$

Для аппроксимации решения представленного уравнения выберем 4-параметрический интерполянт — гиперповерхность, принадлежащую 5-мерному пространству.

Вычислительный алгоритм определения 4-параметрического интерполянта включает  $m$  3-параметрических интерполянтов, которые формируют дерево геометрической модели:

$$\begin{cases} M_{ijk} = \sum_{\sigma=1}^{\tau} M_{ijk\sigma} p_{ijk\sigma}(u); \\ \dots; \\ M_{ij} = \sum_{k=1}^l M_{ijk} q_{ijk}(v); \\ \dots; \\ M_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} r_{ij}(w); \\ \dots; \\ M = \sum_{i=1}^m M_i s_i(\varphi), \end{cases} \quad (12)$$

где  $p_{ijk\sigma}(u)$  — функции параметра  $u$ ;

$q_{ijk}(v)$  — функции параметра  $v$ ;

$r_{ij}(w)$  — функции параметра  $w$ ;

$s_i(\varphi)$  — функции параметра  $\varphi$ .

Выполним покоординатный расчет последовательности уравнений (12) для 5-мерного пространства. Для этого примем декартову систему координат с осями  $x, y, z, t$  и  $U$ . С учетом особых свойств дуг алгебраических кривых, полученных на основе полиномов Бернштейна [17], находим

$$\begin{cases} t = a_t u + b_t; \\ x = a_x v + b_x; \\ y = a_y w + b_y; \\ z = a_z \varphi + b_z; \\ U = \sum_{i=1}^m U_i s_i(\varphi), \end{cases} \quad (13)$$

где  $U_i = \sum_{j=1}^n U_{ij} r_{ij}(w)$ ,  $U_{ij} = \sum_{k=1}^l U_{ijk} q_{ijk}(v)$ ,

$U_{ijk} = \sum_{\sigma=1}^{\tau} U_{ijk\sigma} p_{ijk\sigma}(u)$ ;

$a_t, a_x, a_y, a_z, b_t, b_x, b_y, b_z$  — параметры, определяемые по аналогии с (3).

Поскольку первые четыре уравнения системы (13) линейно зависят от параметров, перейдем к уравнению, заданному в явном виде:  $U = f(x, y, z, t)$ . Продифференцируем его в соответствии с уравнением (11). Подставляя поочередно значения параметров в узловые точки интерполянта, составим СЛАУ, решив которую, получим искомое численное решение уравнения (11).

#### Заключение

Предложен подход к численному решению дифференциальных уравнений с помощью геометрического интерполянта, в пределах которого представлена классификация решений ДУ в зависимости от размерности лапласиана. Следует отметить, что предложенный подход легко обобщить на многомерное пространство, поэтому его можно использовать для решения дифференциальных уравнений со сколь угодно большим количеством переменных. При этом вычислительный алгоритм решения ДУ остается инвариантным по отношению к количеству переменных, увеличиваются лишь размерность геометрического интерполянта и количество уравнений покоординатного расчета. Необходимо отметить, что в работе представлен принципиальный подход к решению ДУ, который дает



множество решений. В зависимости от начальных и граничных условий исходного дифференциального уравнения аппроксимация его решения будет иметь свою специфику, описание которой относится к перспективе дальнейших исследований.

#### Литература

1. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1981. — 512 с.
2. Степанов В. В. Курс дифференциальных уравнений. — М.: Эдиториал УРСС. Изд. 8, стер., 2004. — 472 с.
3. Калиткин Н. Н. Численные методы: учеб. пособие. Изд. 2, исправл. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 592 с.
4. Меркулова Н. Н., Михайлов М. Д. Разностные схемы для обыкновенных дифференциальных уравнений. — Томск: ТГУ, 2004. — 122 с.
5. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов. Т. 2: учеб. пособ. для втузов. Изд. 13. — М.: Физматлит, 1985. — 560 с.
6. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1977. — 736 с.
7. Лоханский Я. К. Основы вычислительной гидромеханики и теплообмена: учеб. пос. — М.: Изд-во МГИУ, 2008. — 75 с.
8. Конопацкий Е. В. Решение дифференциальных уравнений методами геометрического моделирования: тр. 28-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению "GraphiCon 2018". 24–27 сентября 2018 г. — Томск: ТПУ, 2018. С. 322–325.
9. Конопацкий Е. В. Моделирование аппроксимирующего 16-точечного отсека поверхности отклика применительно к решению неоднородного уравнения теплопроводности // Геометрия и графика. 2019. Т. 7. № 2. С. 38–45. DOI: 10.12737/article\_5d2c1a551a22c5.12136357.
10. Чупров И. Ф., Канева Е. А., Мордвинов А. А. Уравнения математической физики с приложениями к задачам нефтедобычи и трубопроводного транспорта газа: учеб. пособ. — Ухта: УГТУ, 2004. — 128 с.
11. Араманович И. Г., Левин В. И. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1969. — 288 с.
12. Конопацкий Е. В. Принципы построения компьютерных моделей многофакторных процессов методом многомерной интерполяции: сб. мат. II Междунар. науч.-практ. конф. "Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2018)". 14–15 ноября 2018 г. — Донецк: ДонНТУ, 2018. С. 277–287.
13. Конопацкий Е. В. Геометрическое моделирование и оптимизация многофакторных процессов методом многомерной интерполяции: тр. Междунар. науч. конф. по физико-техн. информатике СРТ2018. 28–31 мая 2018 г. — Москва-Протвино, 2018. С. 299–306.
14. Конопацкий Е. В. Геометрическая теория многомерной интерполяции // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020. № 1 (07). С. 9–16.
15. Балюба И. Г. Конструктивная геометрия многообразий в точечном исчислении: дис. ... д-ра техн. наук. 05.01.01. — Макеевка, 1995. — 227 с.
16. Балюба И. Г., Найдых В. М. Точечное исчисление: учеб. пособ. — Мелитополь: МГПУ им. Б. Хмельницкого, 2015. — 236 с.
17. Конопацкий Е. В. Моделирование дуг кривых, проходящих через наперед заданные точки // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2019. № 2. С. 30–36. DOI: 10.14489/vkit.2019.02.pp.030-036.

## SOLVING DIFFERENTIAL EQUATIONS USING GEOMETRIC INTERPOLANTS

O. A. Shevchuk, E. V. Konopatskiy

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka,  
Donetsk People's Republic

*The article proposes an approximation of the solution of differential equations using geometric interpolants. The application of this method to obtain a numerical solution of differential equations with one, two, three, and four independent variables is considered. A computational solution algorithm is described for each case. It is noted that when the number of variables increases, the computational algorithm remains unchanged, only increasing the dimension of the geometric interpolant and the number of equations of coordinate calculation.*

**Keywords:** geometric interpolant, approximation, differential equations, numerical solution.

Шевчук Оксана Александровна, ассистент кафедры "Высшая математика и информатика".

E-mail: ks81@rambler.ru

Конопацкий Евгений Викторович, доцент кафедры "Специализированные информационные технологии и системы".

E-mail: e.v.konopatskiy@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2020 г.

УДК 621.314

# РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА

С. В. Федоров, канд. техн. наук

Кумертауский филиал ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»,  
г. Кумертау, Республика Башкортостан, Россия

*Описано устройство формирования переключающих функций управляющего блока преобразователя частоты для системы управления электроприводом, построенного по принципу прямого формирования сигнала. Разработан алгоритм формирования переключающих функций системы управления преобразователем частоты с линейной и синусоидальной синхронизацией. Показан результат моделирования переключающих функций системы управления преобразователем частоты.*

**Ключевые слова:** система управления электроприводом, модулирующий сигнал, синхронизирующий сигнал.

При проектировании систем управления преобразователем частоты для частотного управления электроприводом наиболее значимым критерием является качество выходного сигнала для системы частотного управления электроприводом. В целях улучшения гармонического состава выходного сигнала для системы частотного управления электроприводом (управляющего сигнала) в преобразователях вносят изменения в силовую часть или в ее систему управления либо изменяют обе части преобразователя.

Одним из алгоритмов является прямое формирование управляющего сигнала, которое осуществляют в непосредственных преобразователях частоты с однократной модуляцией. Формирование управляющего сигнала осуществляют путем циклического подключения нагрузки поочередно к каждой из фаз источника [1–4].

Цель данной работы — разработка алгоритма формирования переключающих функций системой управления преобразователей частоты для исследования влияния различных параметров на качество управляющего сигнала системы частотного управления электроприводом.

## Анализ устройства формирования переключающих функций управляющего блока преобразователя частоты и разработка алгоритма его функционирования

Структура устройства формирования переключающих функций управляющего блока преобразователя для системы частотного управления электроприводом, построенного по принципу прямого формирования управляющего сигнала, приведена на рис. 1 [1].

В каждом канале модулирующий сигнал  $M(t)$  вычитается из синхронизирующего сигнала  $f_{1A}(t)$ , ( $f_{1B}(t)$ ,  $f_{1C}(t)$ ). Полученный в результате сигнал с элемента сравнения ЭС подают на вход нуль-детектора (компаратора) К. Образованный в момент пересечения двух сигналов сигнал 1 с компаратора поступает в генератор импульсов (ГИ).

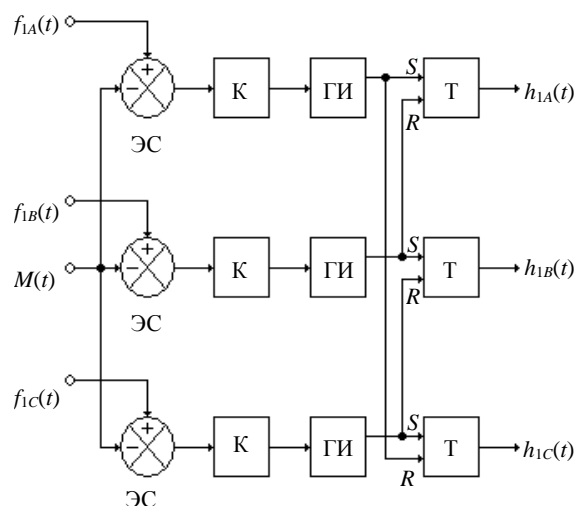


Рис. 1. Устройство формирования переключающих функций системы управления преобразователя частоты

Генератор импульсов вырабатывает импульс, который поступает на триггер Т. Триггер Т выдает сигнал 1 для соответствующей переключающей функции. При этом каждый триггер сбрасывается импульсом, поступающим из следующего канала. Результатом работы данного устройства является формирование переключающих функций  $h_{1A}(t)$ ,  $h_{1B}(t)$ ,  $h_{1C}(t)$ .

Для количественного анализа качества управляющего сигнала на основе математических моделей разработаны алгоритмы построения управляющего сигнала для систем управления с циклическим переключением входных сигналов [5, 6]. В качестве модулирующих выбраны пять функций: трапецеидальная, линейная, треугольная, синусоидальная, прямоугольная. Алгоритм позволяет выбирать тип синхронизирующих функций (положительный или отрицательный).

На рис. 2 приведен алгоритм формирования переключающих функций системой управления преобразователем частоты с линейной синхронизацией.

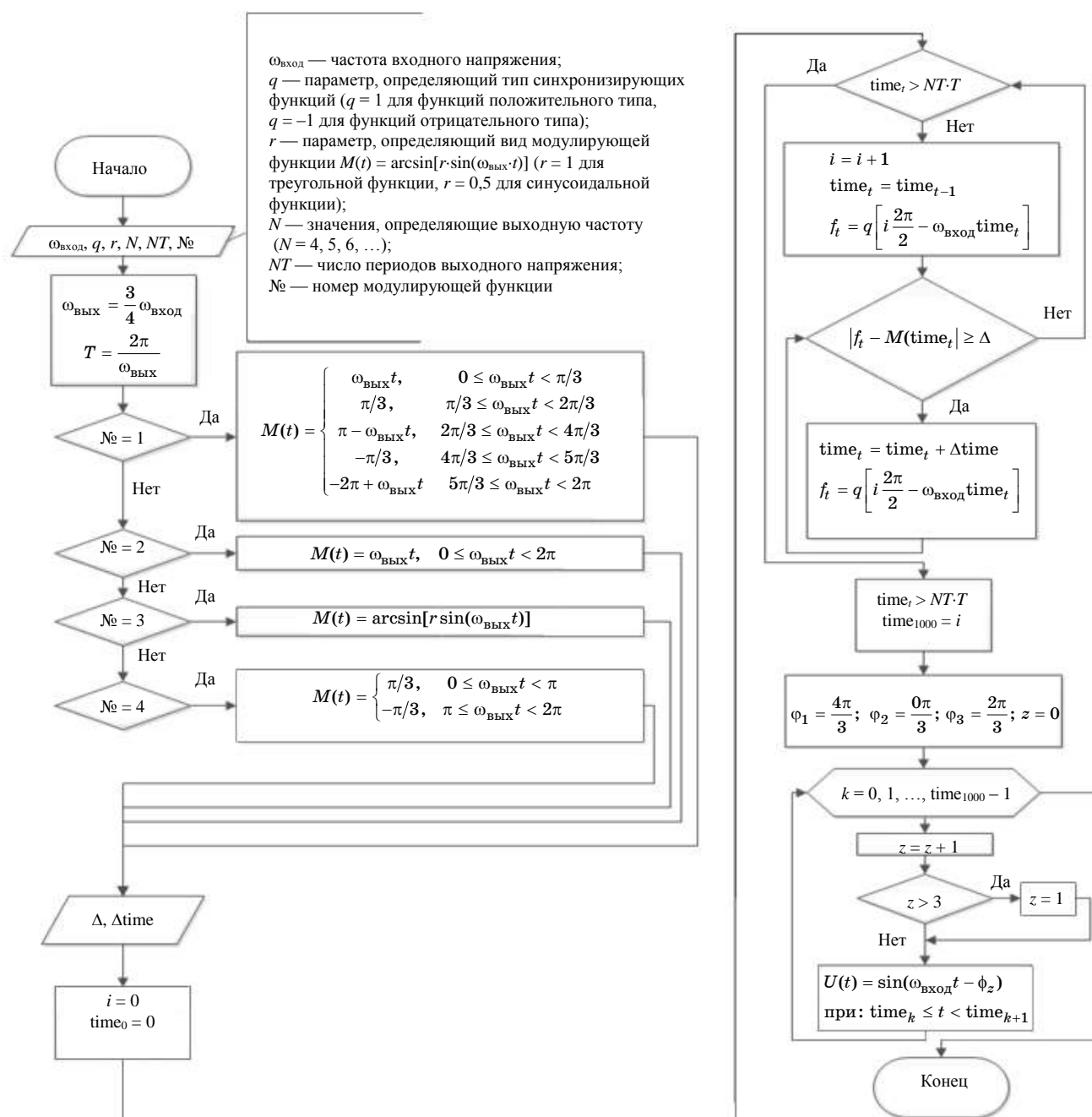


Рис. 2. Алгоритм формирования переключающих функций системой управления преобразователем частоты с линейной синхронизацией

На рис. 3 приведен алгоритм формирования переключающих функций системой управления преобразователем частоты с синусоидальной синхронизацией. В качестве модулирующих также выбраны пять функций: трапецеидальная, линейная, треугольная, синусоидальная, прямоугольная. Алгоритм позволяет выбирать

тип синхронизирующих функций (положительный или отрицательный).

Результатом моделирования стало получение переключающих функций системой управления при различных модулирующих функциях с линейной и синусоидальной синхронизацией [7–10].

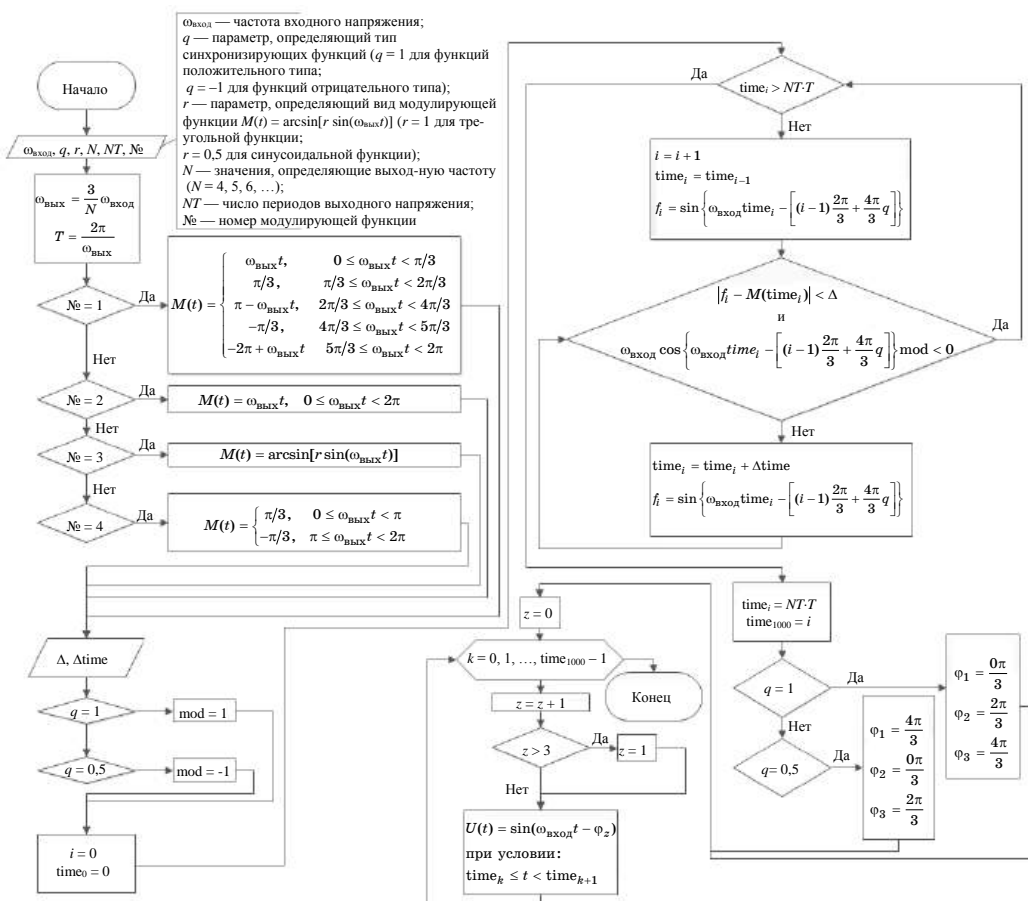


Рис. 3. Алгоритм формирования переключающих функций системой управления преобразователем частоты с синусоидальной синхронизацией

### Результаты моделирования

На рис. 4 приведен результат моделирования переключающих функций системой управления преобразователем частоты при линейной синхронизации и трапецеидальной модулирующей функции ( $h_{1A}, h_{1B}, h_{1C}$  — переключающие функции для фаз A, B, C соответственно).  $h_{1A} = 1$  означает, что в данное время замкнут ключ, подключающий фазу A к нагрузке.

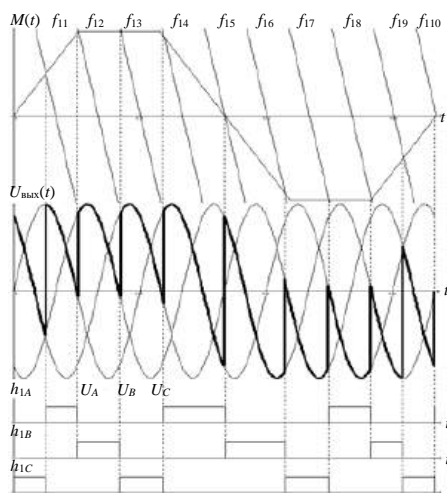


Рис. 4. Результат моделирования алгоритма формирования переключающих функций системы управления преобразователем частоты при линейной синхронизации и трапецеидальной модулирующей функции

При этом все остальные ключи разомкнуты (аналогично для функций  $h_{1B}, h_{1C}$ ). В качестве синхронизирующих использованы функции положительного типа.

На рис. 5 приведен результат моделирования алгоритма формирования переключающих функций системы управления преобразователем частоты при линейной синхронизации и синусоидальной модулирующей функции.

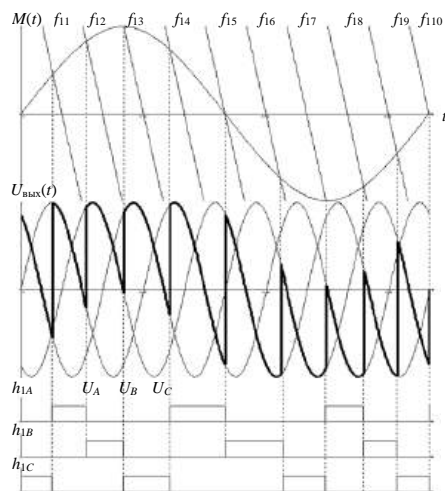


Рис. 5. Результат моделирования алгоритма формирования переключающих функций системы управления преобразователем частоты при линейной синхронизации и синусоидальной модулирующей функции



## Заклучение

Анализ результатов моделирования алгоритма формирования переключающих функций системы управления преобразователем частоты при прямоугольной модуляции (вне зависимости от вида синхронизирующей функции) показал невозможность получения симметричной кривой, имеющей, как и синусоида, среднее значение, равное нулю, а также являющейся нечетной (коэффициенты ряда Фурье  $a_0 = a_k = 0$ ). Это связано с тем, что модулирующая функция является кусочно-непрерывной функцией 1-го рода, т. е. в точках разрыва значение этой функции не определено, поэтому нельзя определить точку ее пересечения с синхронизирующими функциями.

Таким образом, разработан алгоритм, позволяющий производить исследования влияния различных параметров на качество управляющего сигнала системы частотного управления электроприводом за счет использования математической модели, построенной на основе переключающих функций.

Данный алгоритм формирования сигнала является наиболее адекватным, т. к. он учитывает влияние как системы управления, так и силовой части преобразователя на его форму, что является более полным отражением влияния параметров на качество управляющего сигнала системы частотного управления электроприводом.

Алгоритм позволяет оперативно определить структуру устройства формирования переключающих функций в соответствии с заданным качеством управляющего сигнала системы частотного управления электроприводом.

Разработанный алгоритм универсален, поскольку его можно применять для формирования сигнала различных принципов управления.

## Литература

1. Джюджи Л., Пели Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты: теория, характеристики, применение / пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 400 с.
2. Жемеров Г. Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. — М.: Энергия, 1977. — 280 с.
3. Карташов Р. П., Кулиш А. К., Чехет Э. М. Тиристорные преобразователи частоты с искусственной коммутацией. — К.: Техника, 1979. — 152 с.
4. Федоров С. В., Бондарев А. В. Способы широтно-импульсной модуляции на основе сравнения синхронизирующих сигналов с сигналами модуляции матричных преобразователей частоты // Вестник ОГУ. 2014. № 3 (164). С. 180—186.
5. Федоров С. В., Бондарев А. В. Анализ влияния структуры системы управления непосредственным преобразователем частоты на основе прямого преобразования на качество выходного напряжения: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. "Роль технических наук в развитии общества" 22 августа 2014 г. — Уфа: Аэтерна, 2014. С. 50—55.
6. Федоров С. В., Рогинская Л. Э., Бондарев А. В. Влияние алгоритмов формирования выходного напряжения системой управления на качественные показатели матричного преобразователя частоты. Практическая силовая электроника. — М.: Изд-во ЗАО "ММП-Ирбис". 2014. № 4 (56). С. 27—31.
7. Федоров С. В., Рогинская Л. Э., Бондарев А. В. Моделирование выходного напряжения матричного преобразователя частоты. Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: мат. Междунар. науч.-практ. конф. 30 сентября 2014. Т. 1. С. 50—59.
8. Bondarev A. V., Fedorov S. V., Muravyova E. A., Kadyrov R. R., Shulaeva E. A. The Questions of Circuitry Design when Forming the Switching Functions of the Control System of the Matrix Frequency Converter // Indian J. Science & Technology. 2016. V. 8. Special Iss. 10.
9. Bondarev A., Fedorov S., Muraveva E., Kadyrov R., Charikov P., Shulaeva E. The impact of algorithms of forming switching functions of the control system in matrix frequency converter on output voltage THD // J. Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. V. 41. Iss. 2. P. 82—86.
10. Bondarev A. V., Fedorov S. V., Muravyova E. A. Control systems with pulse width modulation in matrix converters: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052008.

## DEVELOPMENT AND MODELING OF THE UNIVERSAL ALGORITHM OF FUNCTIONING OF THE DEVICE OF FORMATION OF SWITCHING FUNCTIONS OF CONTROL SYSTEM OF THE FREQUENCY CONVERTER ON THE BASIS OF DIRECT CONVERSION OF A SIGNAL

S. V. Fedorov

Department of Power Industry of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University", Kumertau, Bashkortostan, Russia

*This article describes the device of formation of switching functions of the control unit of the frequency converter for the electric drive control system, built on the principle of direct signal formation. An algorithm for the formation of switching functions of the frequency converter control system with linear and sinusoidal synchronization. The following is the simulation result of the switching functions of the control system of the frequency converter.*

**Keywords:** electric drive control system, modulating signal, synchronizing signal.

Федоров Сергей Витальевич, доцент кафедры "Электроснабжение промышленных предприятий".

E-mail: proinfosystem@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16 марта 2020 г.

УДК 629.7.054.07:629.7.01

## ЗАДАЧА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ПОДСИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПОИСКА ЦЕЛЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СТАНЦИЯМИ

Н. С. Васина; М. Н. Машкин, канд. техн. наук; О. Т. Романов, канд. техн. наук  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

А. Ю. Волков  
НТЦ «НИИРП» ПАО «НПО «Алмаз», Москва, Россия

*Рассмотрен вопрос оптимального распределения радиолокационных ресурсов подсистемы радиолокационных станций, управляемых из одного радиолокационного центра, при организации поиска и сопровождения групповых целей. Сформулирована математическая постановка задачи, разработан алгоритм ее решения, написано и отлажено его программное обеспечение.*

**Ключевые слова:** центральное радиолокационное поле, радиолокационный центр, автоматизированная система обработки информации и управления, радиолокационная станция, командно-вычислительный пункт, групповая цель.

Общую постановку рассматриваемой задачи формулируют следующим образом: в некотором регионе (области) страны установлено определенное количество удаленных друг от друга радиолокационных станций (РЛС), охватывающих центральное радиолокационное поле (ЦРЛП) региона. Управление РЛС осуществляют из командно-вычислительного пункта (КВП) в радиолокационном центре (РЛЦ) средствами автоматизированной системы обработки информации и управления РЛС (АСОИУ РЛС). Получив информацию о групповых целях (ГЦ) в ЦРЛП региона, КВП определяет характеристики этих ГЦ, возможности работы по ним каждой РЛС, расположенной в регионе, и с учетом этого определяет дальнейшее обслуживание ГЦ соответствующими РЛС.

В данной работе приведено краткое описание организационно-функциональной структуры АСОИУ РЛС, дана формализованная постановка задачи распределения РЛС по ГЦ, обоснован выбор метода и модели решения задачи на конкретных числовых примерах, необходимое программное обеспечение.

### Описание и организационно-функциональная структура АСОИУ РЛС

Автоматизированная система обработки информации и управления РЛС относится к классу систем, объектом управления которых являются комплексы летательных аппаратов. Одной из первых работ, где дается определение комплекса летательных аппаратов (КЛА), является работа [1].

Вопросы проектирования АСОИУ, в том числе когда объектом управления являются КЛА, рассмотрены в работах [2, 3]. При этом в качестве ЛА могут выступать как управляемые пилотами, так и беспилотные ЛА (БПЛА).

На КВП РЛЦ возложено решение следующих задач:

- информационное взаимодействие с КВП ЦРЛП;
  - поиск РЛС ГС в заданном ЦРЛП по целеуказаниям от КВП ЦРЛП либо в автономном режиме;
  - построение траекторий движения целей, организация их сопровождения РЛС.
- Решение этих задач в КВП РЛЦ осуществляют средствами автоматизированной системы обработки информации и управления радиолокационными станциями. Организационно-функциональная структура системы исходя из ее назначения включает следующие функциональные подсистемы (рис. 1):
- информационного взаимодействия с КВП ЦРЛП (располагается в РЛЦ);
  - "Поиск целей" (располагается в РЛЦ);
  - управления аппаратной частью (располагается на РЛС).



Рис. 1. Схема организационно-функциональной структуры АСОИУ РЛС

В качестве основного технического средства для решения задач распределения радиолокационных ресурсов РЛС операторы на рабочих местах АСОИУ РЛС используют персональные компьютеры, обладающие достаточной вычислительной мощностью и программной поддержкой.

#### Формализованная постановка задачи распределения радиолокационных ресурсов РЛС для обнаружения и сопровождения ГЦ

Задаче оптимального управления режимом наведения многофункциональной РЛС на ГЦ посвящена работа [4]. Однако рассмотренные в ней постановка и метод решения не охватывают весь спектр проблем, которые должны быть рассмотрены при поиске решения задачи распределения радиолокационных ресурсов РЛС для организации поиска и сопровождения ГЦ. Это обусловило необходимость постановки и формализации рассматриваемой в работе данной задачи. Введем обозначения:

- $k$  — количество многоканальных РЛС. Каждая РЛС способна искать и сопровождать цели в различных направлениях, но с ограниченной дальностью (вероятностные характеристики РЛС зависят от дальности нахождения области ее работы);

- $n$  — количество ГЦ. Групповая цель представляет собой совокупность целей, обладающих пространственно-временной близостью, которая при доступности ГЦ отдельной РЛС позволяет ей обслуживать каждую цель из этой совокупности;

- $V_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) — важность  $j$ -й ГЦ ( $0 \leq V_j \leq 100$ ), определяемая РЛЦ на основании анализа траектории ГЦ и типа ее комплектации;

- $Q_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) — требуемый радиолокационный потенциал, необходимый для обслуживания всех целей в ГЦ ( $0 \leq Q_j \leq 1000$ ). Определяется РЛЦ на основании оценки размеров ГЦ, количества в ней целей и необходимости проведения в области ГЦ дополнительного поиска целей;

- $W_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) — располагаемый радиолокационный потенциал РЛС ( $0 \leq W_i \leq 5000$ ). Расходуется на сопровождение и поиск целей;

- $w_{ij}$  ( $i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n$ ) — требующий определения радиолокационный потенциал (ресурсов)  $i$ -й РЛС, выделяемый на обслуживание  $j$ -й ГЦ ( $0 \leq w_{ij} \leq 1000$ );

- $p_{ij}$  ( $i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n$ ) — вероятность обеспечения обслуживания РЛС с номером  $i$  ГЦ с номером  $j$  ( $0 \leq p_{ij} \leq 1$ ). Определяется РЛЦ на основании определения удаленности ГЦ с номером  $j$  от РЛС с номером  $i$ .

Общая постановка задачи состоит в определении оптимального плана распределения ра-

диолокационных потенциалов региональных РЛС для обслуживания обнаруженных ГЦ, т. е. величин  $w_{ij}$  ( $i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n$ ).

В качестве критерия оптимальности предложена суммарная важность  $F$  обслуживания всеми РЛС, расположенными в регионе (области) страны, всех обнаруженных ГЦ.

Вследствие этого математическая постановка задачи состоит в определении максимального значения функции  $F$ . Содержательный смысл этой функции состоит в том, что чем меньше РЛС расходует свои ресурсы на обслуживание наиболее важных целей, тем эффективнее работа РЛС по целям, т. е. производится быстрое обслуживание приоритетных  $x$  целей в первую очередь. Тогда критерий оптимальности  $F$  определяется как

$$F = \sum_{j=1}^n (V_j / Q_j) \sum_{i=1}^k (p_{ij} w_{ij}) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k (V_j / Q_j) p_{ij} w_{ij}.$$

Введем обозначение

$$C_{ij} = (V_j / Q_j) p_{ij} \quad (i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n).$$

Тогда выражение для критерия оптимальности  $F$  можно записать в следующем компактном виде:

$$F = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k C_{ij} w_{ij}. \quad (1)$$

При поиске максимума функции  $F$  необходимо соблюдать ограничения (условия), определенные, во-первых, неотрицательными значениями величин  $w_{ij}$  ( $i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n$ ), во-вторых — ограничениями на располагаемый радиолокационный потенциал (ресурс) РЛС и ограничениями на требуемый радиолокационный потенциал (ресурс), необходимый для обслуживания всех целей в  $j$ -м ГЦ.

Данные ограничения можно записать в следующем виде:

$$w_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n); \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{ij} \leq W_i \quad (i = 1, \dots, k); \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^k (p_{ij} w_{ij}) \leq Q_j \quad (j = 1, \dots, n). \quad (4)$$

Таким образом, радиолокационный потенциал  $i$ -й РЛС, выделяемый на обслуживание  $j$ -й ГЦ, должен быть всегда неотрицателен, но не превышать значение располагаемого радиолокационного потенциала РЛС. Также произведение вероятности обеспечения обслуживания  $i$ -й РЛС ГЦ с номером  $j$  и радиолокационного потенциала  $i$ -й РЛС, выделяемого на обслуживание  $j$ -й

ГЦ, не должно превышать значение требуемого радиолокационного потенциала, необходимого для обслуживания всех целей в ГЦ.

Задача (1)–(4) относится к транспортной задаче линейного программирования. В реальных условиях необходимости решения рассматриваемой задачи величина суммы  $\sum_{i=1}^k W_i$  может не

равняться величине суммы  $\sum_{j=1}^n Q_j$ . Поэтому в

общем случае данная транспортная задача может оказаться открытой транспортной задачей.

Для разрешимости открытой транспортной задачи необходимо и достаточно, чтобы выполнялось равенство

$$\sum_{i=1}^k W_i = \sum_{j=1}^n Q_j. \quad (5)$$

Чтобы условие (5) выполнялось, необходимо выполнить следующие операции.

Если  $\sum_{i=1}^k W_i > \sum_{j=1}^n Q_j$ , то вводим фиктивную ГЦ

с номером  $(n+1)$  с требуемым радиолокационным потенциалом  $Q_{n+1} = \sum_{i=1}^k W_i - \sum_{j=1}^n Q_j$  и важно-

стью  $V_{n+1} = 0$ . В этом случае коэффициенты  $C_{in+1} (i=1, \dots, k)$  в формуле (1) становятся равными нулю.

Если  $\sum_{i=1}^k W_i < \sum_{j=1}^n Q_j$ , то вводим фиктивную

РЛС с номером  $(k+1)$  с располагаемым радиолокационным потенциалом  $W_{k+1}$ , вычисляемым

по формуле  $W_{k+1} = \sum_{j=1}^n Q_j - \sum_{i=1}^k W_i$ . Вероятность

обеспечения обслуживания  $j$ -й ГЦ полагаем равной нулю, т. е.  $P_{k+1j} = 0 (j=1, \dots, n)$ .

В этом случае в формуле (1) все коэффициенты  $C_{k+1j} (j=1, \dots, n)$  станут равными нулю.

Нахождение решения транспортной задачи осуществляют в два этапа [5]. На первом этапе находят так называемое опорное решение задачи. На втором этапе проверяют условие оптимальности полученного опорного решения и при отсутствии такового выполняют шаги изменения опорного решения до получения оптимального решения.

Эффективность, быстродействие выполнения второго, заключительного этапа решения транспортной задачи во многом зависит от результата решения задачи на первом этапе, т. е. полученного опорного решения. Поэтому возникает необходимость выбора (определения) наиболее приемлемого метода нахождения опорного плана.

Наиболее известными методами нахождения опорных планов являются методы: северо-западного угла, минимального элемента, двойного предпочтения и аппроксимации Фогеля [6].

Существуют также методы получения оптимального опорного плана транспортной задачи. К ним относят венгерский метод, метод потенциалов и дельта-метод.

Покажем на численных примерах сравнительную эффективность каждого из известных методов нахождения опорного плана для транспортной задачи при разных размерностях матриц. В табл. 1–3 приведены варианты задач. Все величины получены на основании оценочной работы КВП.

Таблица 1

Вариант задачи малой размерности (4×3)

ГЦ \ РЛС	ГЦ 1	ГЦ 2	ГЦ 3	Имеющийся в РЛС потенциал
РЛС 1	0,200	0,300	1,455	$W_1 = 10$
РЛС 2	0,420	0,800	0,033	$W_2 = 5$
РЛС 3	0,400	0,150	0,600	$W_3 = 11$
РЛС 4	0,100	0,200	0,300	$W_4 = 9$
Требуемый потенциал для ГЦ	15	20	3	38

Таблица 2

Вариант задачи средней размерности (6×5)

ГЦ \ РЛС	ГЦ 1	ГЦ 2	ГЦ 3	ГЦ 4	ГЦ 5	Имеющийся в РЛС потенциал
РЛС 1	0,100	0,100	0,300	1,455	0,600	$W_1 = 10$
РЛС 2	0,420	0,880	0,033	2,909	0,073	$W_2 = 5$
РЛС 3	0,400	0,150	0,600	2,000	0,147	$W_3 = 11$
РЛС 4	0,100	0,200	0,300	1,455	0,367	$W_4 = 9$
РЛС 5	0,700	0,032	1,000	0,045	0,073	$W_5 = 14$
РЛС 6	2,000	1,000	0,032	0,073	0,360	$W_6 = 2$
Требуемый потенциал для ГЦ	15	20	3	11	1	50



Таблица 3

Вариант задачи большой размерности (10×8)

РЛС \ ГЦ	ГЦ 1	ГЦ 2	ГЦ 3	ГЦ 4	ГЦ 5	ГЦ 6	ГЦ 7	ГЦ 8	Имеющийся в РЛС потенциал
РЛС 1	0,100	0,300	1,455	2,455	0,600	1,326	0,033	1,267	$W_1 = 10$
РЛС 2	0,420	0,800	0,033	0,600	0,420	1,245	1,245	1,345	$W_2 = 5$
РЛС 3	0,400	0,150	0,600	2,000	0,346	0,450	0,420	0,600	$W_3 = 11$
РЛС 4	0,100	0,200	0,300	1,455	1,455	0,256	0,073	0,756	$W_4 = 9$
РЛС 5	1,455	2,453	0,569	0,033	0,010	0,450	0,453	0,001	$W_5 = 7$
РЛС 6	0,400	1,345	0,073	0,420	0,600	0,073	0,569	0,600	$W_6 = 12$
РЛС 7	1,256	2,543	1,345	0,600	1,345	0,560	0,001	1,345	$W_7 = 5$
РЛС 8	1,455	0,600	1,000	0,256	0,001	0,073	0,569	0,600	$W_8 = 8$
РЛС 9	2,256	1,568	0,073	0,569	0,013	0,420	1,345	0,073	$W_9 = 14$
РЛС 10	0,600	0,420	1,455	0,420	0,073	2,600	0,033	1,600	$W_{10} = 10$
Требуемый потенциал для ГЦ	15	20	3	6	11	2	14	23	94

В качестве примеров выбираем варианты для открытой транспортной задачи, поскольку в большинстве случаев значения требуемого потенциала РЛС для сопровождения целей и располагаемого потенциала РЛС не совпадают (либо потребный потенциал больше располагаемого, либо наоборот), в чем и состоит одна из проблем данной транспортной задачи, которую необходимо решить.

Сравним графики для методов построения опорного плана и методов нахождения оптимального плана, где по оси абсцисс отложим размерность матриц, приведенных в качестве примера, а по оси ординат — количественные характеристики (количество итераций, необходимых для достижения результата тем или иным методом, значение целевой функции  $F$  и значение оптимальной целевой функции  $F^*$ ) (рис. 2, 3).

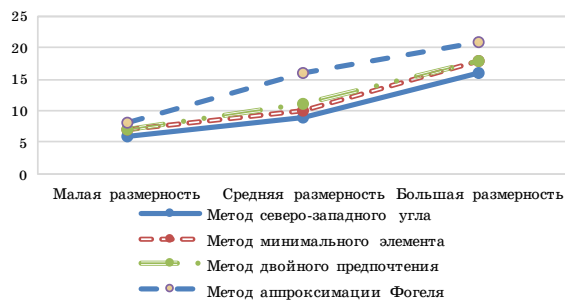
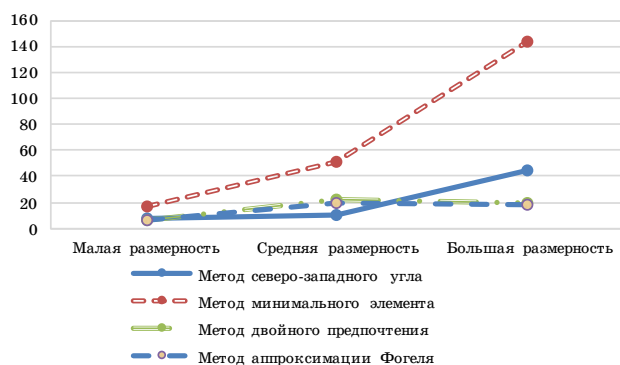


Рис. 2. Количество итераций при нахождении опорного плана

Рис. 3. Значения функции  $F$ 

Как видно из рисунка, метод минимального элемента дает наиболее оптимальное решение, но ценой большего количества итераций и больших вычислений.

Теперь покажем на численном примере эффективность каждого из известных методов нахождения оптимального плана для транспортной задачи при разных размерностях матрицы (рис. 4).

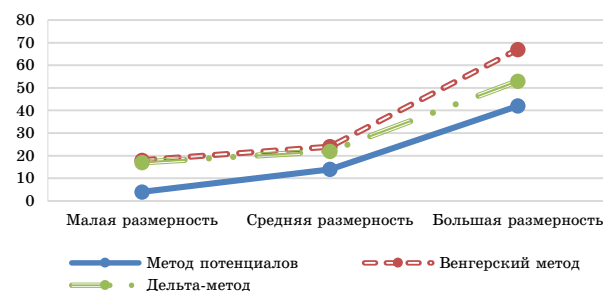
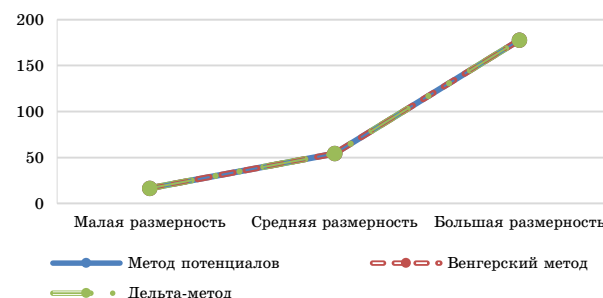


Рис. 4. Количество итераций при нахождении оптимального плана

Как можно заметить, на рис. 5 совпали результаты по всем методам. Это означает, что рационально выбирать тот метод нахождения оптимальной функции, который находит результат за наименьшее число итераций, т. е. метод потенциалов.

Рис. 5. Значения оптимальной функции  $F^*$ 

Полученные результаты позволили сформировать сравнительные таблицы методов нахождения опорного плана и оптимального плана (табл. 4, 5).

Таблица 4

Сравнительная таблица методов получения опорного плана

Метод	Достоинства	Недостатки
Северо-западного угла	Самый быстрый и простой по вычислениям способ получения опорного плана	Не учитывается стоимость
Минимального элемента	В отличие от метода северо-западного угла учитывается стоимость	Стоимость учитывается только по столбцу или только по строке матрицы
Двойного предпочтения	Стоимость учитывается и по столбцу, и по строке матрицы	План неоптимален
Аппроксимации Фогеля	Учитывается стоимость	План крайне неоптимален

Таблица 5

Сравнительная таблица методов получения оптимального плана

Метод	Достоинства	Недостатки
Потенциалов	Нет необходимости в поиске циклов с отрицательной ценой. Достаточно быстрое определение оптимального плана	При использовании этого метода необходимо иметь допустимый опорный план, полученный каким-либо способом
Венгерский	Возможность оценивать близость результата каждой из итераций к оптимальному плану. Не требует построения опорного плана	Достаточно трудоемкий процесс вычислений, требующий большого количества слепого перебора
Дельта	Всегда определяется оптимальный план. Позволяет решать открытую модель транспортной задачи, не приводя ее к закрытой модели.	Достаточно трудоемкий процесс вычислений. Можно использовать только в том случае, если все значения элементов матрицы стоимости неотрицательны. Позволяет решать открытую модель транспортной задачи только при условии, что все перераспределения произведены по наилучшим цепочкам

Исследование показало, что для нахождения опорного плана наиболее эффективно использовать метод северо-западного угла, а для улучшения плана — метод потенциалов.

Метод северо-западного угла состоит в последовательном переборе строк и столбцов транспортной таблицы, начиная с левого столбца и верхней строки, и выписывании максимально возможных отгрузок (радиолокационных потенциалов) в соответствующие ячейки таблицы так, чтобы не были превышены заявленные (требуемые потенциалы РЛС) в задаче возмож-

ности поставщика (РЛС) или потребности потребителя (требуемый потенциал РЛС, необходимый для обслуживания ГЦ). На цены доставки в этом методе не обращают внимания, поскольку предполагают дальнейшую оптимизацию плана.

Улучшение полученного опорного плана выполняют методом потенциалов. Алгоритм метода потенциалов состоит в следующем: каждой  $i$ -й РЛС ставят в соответствие некоторое число ( $u$ ), которое называют потенциалом  $i$ -й РЛС; каждой  $j$ -й ГЦ ставят в соответствие некоторое число ( $v$ ), которое называют потенциалом  $j$ -й ГЦ. Для каждой заполненной клетки, т. е. для каждой базисной переменной, строят соотношения

$$u_i + v_j = C_{ij}.$$

В результате получают систему с числом уравнений, равным количеству базисных переменных. Из этой системы определяют неизвестные потенциалы ( $u$ ) и ( $v$ ), полагая  $u = 0$ . Для каждой незаполненной клетки, т. е. для каждой небазисной переменной, рассчитывают ( $C$ ) по формуле  $u_i + v_j = C_{ij}$ . Затем полученный план проверяют на оптимальность.

#### Выбор программного обеспечения для реализации модели

Для разработки программы использовали средства языка программирования C++ и среду программирования Visual Studio 2017.

#### Разработка архитектуры программы

Программа состоит из шести классов:

- Vector, служащий для задания одномерного массива как вектора;
- Matrix, служащий для задания двумерного массива как двумерного вектора;
- PlanMatrix, определяющий размер матриц;
- PotentialsMethod, реализующий метод потенциалов (задание потенциалов ( $v$ ) и ( $u$ ), нахождение их значений, проверка опорного плана на оптимальность, улучшение опорного плана, укладываясь в определенное количество итераций);
- TableNCM, реализующий метод северо-западного угла (проверка баланса, составление опорного плана, проверка опорного плана на вырожденность);
- Solver, существующий для всех вычислений (проверка выполнения определенных условий у переменных, вызов классов метода северо-западного угла и метода потенциалов, вывод на консоль результатов работы программы).

Схема структуры программного обеспечения изображена на рис. 6.

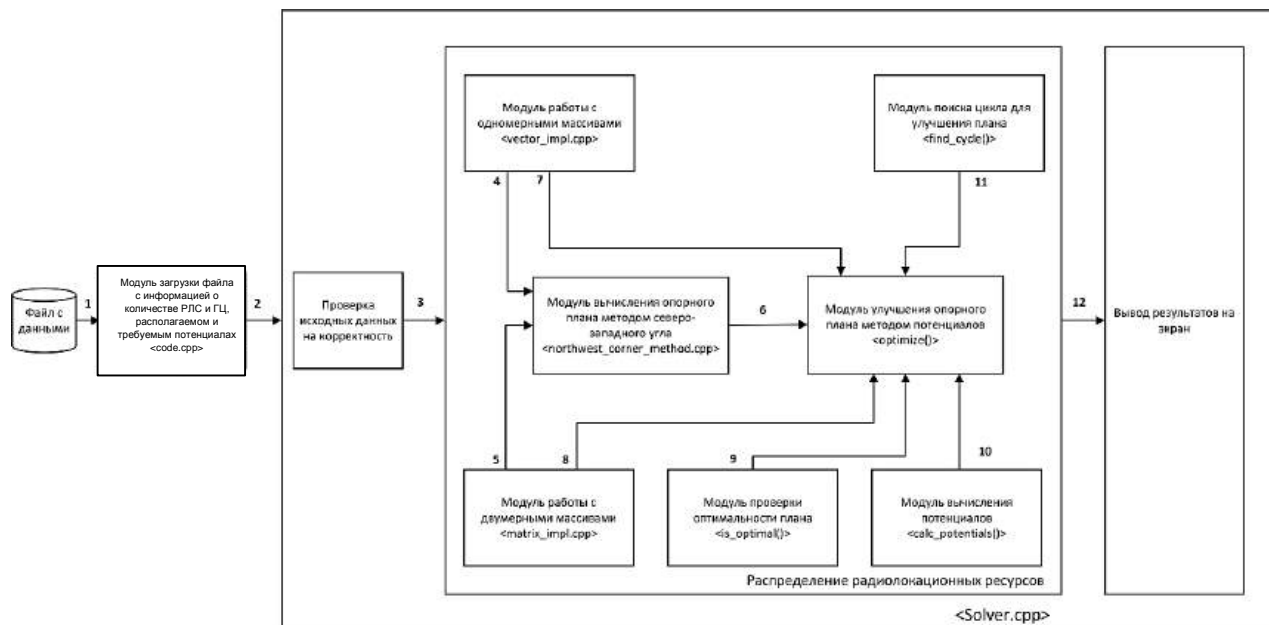


Рис. 6. Схема структуры программного обеспечения

Процесс обработки информации при решении задачи распределения радиолокационных ресурсов можно подразделить на три подпроцесса:

- обработка входных данных;
- формирование результата работы алгоритма нахождения опорного плана распределения радиолокационных ресурсов;
- формирование результата работы алгоритма нахождения улучшенного опорного (оптимального) плана распределения радиолокационных ресурсов.

На первом этапе из файла "input.txt" входных данных подсистемы загружают информацию о количестве РЛС, ГЦ, о важности каждой ГЦ, о располагаемом и требуемом радиолокационных потенциалах, о радиолокационном по-

тенциале  $i$ -й РЛС, выделяемом на  $j$ -ю ГЦ, о вероятности обеспечения  $i$ -й РЛС обслуживания  $j$ -й ГЦ. Эту информацию проверяют на выполнение перечня необходимых для корректной работы алгоритма условий.

Далее на основе этих данных составляют матрицу из коэффициентов  $C_{ij}$ , необходимую для нахождения максимизированной целевой функции. Затем идут подсчет опорного плана методом северо-западного угла и улучшение опорного плана методом потенциалов. Данные о количестве РЛС и ГЦ, о важности каждой ГЦ, о располагаемом и требуемом радиолокационных потенциалах, матрицу из коэффициентов  $C_{ij}$ , опорный и оптимальный планы, а также целевую функцию выводят на консоль (рис. 7).

Количество РЛС (K): 5  
Количество ГЦ (N): 10

C:

0.003	0.008	0.029	0.023	0.012	0.003	0.019	0.024	0.005	0.009
0.019	0.032	0.087	0.045	0.002	0.003	0.022	0.012	0.010	0.021
0.011	0.024	0.058	0.006	0.005	0.001	0.004	0.004	0.010	0.004
0.003	0.008	0.029	0.023	0.012	0.001	0.019	0.008	0.005	0.009
0.019	0.032	0.087	0.045	0.002	0.003	0.011	0.012	0.005	0.009

W: 2900.000 2600.000 3030.000 500.000 1020.000  
Q: 550.000 500.000 260.000 710.000 450.000 900.000 350.000 750.000 479.000 350.000

Опорный план

550.000	500.000	260.000	710.000	450.000	430.000	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	470.000	350.000	750.000	479.000	350.000	201.000
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3030.000
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500.000
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1020.000

ЦФ опорного плана F = 66.513

Оптимальный план

-	-	-	450.000	-	-	750.000	-	-	-	1700.000
-	30.000	260.000	710.000	-	900.000	350.000	-	-	350.000	-
-	-	-	-	-	-	-	-	479.000	-	2551.000
550.000	470.000	-	-	-	-	-	-	-	-	500.000
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.000

ЦФ оптимального плана F\* = 127.800

Рис. 7. Скриншот программы вычисления распределения радиолокационных ресурсов

**Литература**

1. Матвеевский С. Ф. Основы системного проектирования комплексов летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1987.
2. Романов О. Т., Машкин М. Н. Модели и алгоритмы автоматизированных систем обработки информации и управления. — М.: Изд-во МАИ, 2010. — 160 с.
3. Романов О. Т., Машкин М. Н. Интеллектуальные автоматизированные системы обработки информации и управ-

ления комплексов летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 2013. — 160 с.

4. Кадубенко С. В., Гомозов А. В., Тарахтей В. П. Метод оптимального управления режимом наведения многофункциональной РЛС // Збірник наукових праць. 2001. Вип. 21. С. 47—53.
5. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М.: Сов. радио, 1972. С. 83—110.
6. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. — М.: Мир, 1985. — 512 с.

## THE PROBLEM OF THE DISTRIBUTION OF RADAR STATION RESOURCES FOR THE SUBSYSTEM FOR ORGANIZING THE SEARCH FOR TARGETS OF AN AUTOMATED INFORMATION PROCESSING AND CONTROL SYSTEM FOR A RADAR STATION

N. S. Vasina, M. N. Mashkin, O. T. Romanov  
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

A. J. Volkov  
NIIRP JSC NPO Almaz named after A. A. Raspletin, Moscow, Russia

*We consider the problem of the optimal distribution of radar station resources of a subsystem of radar stations controlled from one radar center is considered when organizing the search and tracking of group targets. A mathematical formulation of this problem is formulated, an algorithm for its solution is developed, and software is written and debugged.*

**Keywords:** central radar field, radar center, automated information processing and radar control system, radar station, command and computing post, group of target.

**Васина Наталья Сергеевна**, бакалавр.

E-mail: natalievasina@gmail.com

**Машкин Михаил Николаевич**, доцент.

E-mail: mnmashkin@yandex.ru

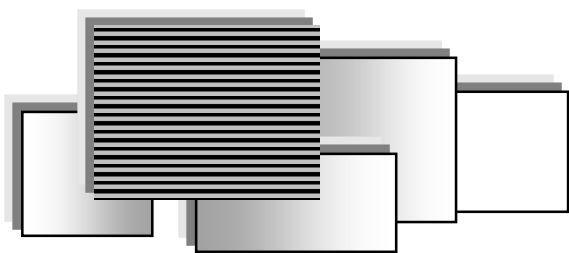
**Романов Олег Тимофеевич**, доцент.

E-mail: r860909@yandex.ru

**Волков Андрей Юрьевич**, заместитель начальника отдела.

E-mail: volkov-ay@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 15 июня 2020 г.*



## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 004.67

### АНАЛИЗ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ "ФАБРИК БУДУЩЕГО" И "ИНДУСТРИЯ 4.0"

Л. В. Журавлева, канд. техн. наук; В. Д. Кирилин; П. О. Репников; М. А. Усюкин  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

*Произведен анализ технологии "фабрик будущего" и переход к "Индустрии 4.0". Проведен обзор ряда научных работ и статей по данной тематике. Выявлено малое понимание о "фабриках будущего" в российском научном сообществе. В связи с этим рассмотрены различные технологии, которые используют в "Индустрии 4.0". Произведена классификация различных видов фабрик. Подробно описан механизм перехода от дискретной фабрики к "умной" и проблемы перевода в новую индустрию. Рассмотрены уникальные способы взаимодействия работы самих предприятий и обучения. Обсуждаемые технологии интегрируются в современное производство. Сформированы этапы цифровой трансформации для перехода на "умные" фабрики, выдвинуты решения возможных проблем при интеграции.*

**Ключевые слова:** "Индустрия 4.0", "фабрики будущего", цифровые фабрики, "умные" фабрики, виртуальные фабрики, киберфизические системы, образовательные цифровые фабрики.

В XVIII в. первая промышленная революция принесла значительные изменения в промышленности, используя пар в качестве источника энергии. Вторая промышленная революция использовала электроэнергию и конвейер для массового производства. Интеграция информационных технологий и компьютеров в производство стала основой третьей промышленной революции. Четвертая промышленная революция выводит на новый уровень производства, когда машины переопределяют свои способы взаимодействия и выполнения отдельных функций. Однако четвертая промышленная революция касается не только промышленности [1–3]. Речь идет об общей трансформации с использованием цифровой интеграции и интеллектуальной инженерии [1, 4–6]. Такая трансформация предполагает уровень производства, где машины будут сами перестраиваться в зависимости от выполнения отдельных функций. Понятие "Индустрия 4.0" изначально было определено как средство повышения конкурентоспособности обрабатывающей промышленности Германии через усиленную интеграцию "киберфизических систем" (CPS) в заводские процессы [7]. Для любой системы, которую рассматривают как "Индустрию 4.0", постоянное подключение, человеческая помощь и децентрализованное при-

нятие решений абсолютно необходимы. Основные компоненты "Индустрии 4.0": киберфизические системы [2], виртуальная [7] и дополненная реальность [8], облачные вычисления, анализ Big Data и т. д.

Цель работы — анализ и систематизация информации об "Индустрии 4.0" и "фабриках будущего", принципах реализации "умных" фабрик в российских реалиях, проблемах, которые могут возникнуть при переходе к новой индустрии и формировании предложений по внедрению "умных" образовательных фабрик.

Достижение поставленных целей предусматривает анализ положений концепции "Индустрия 4.0", анализ технологии цифрового инструментального производства и их использование в "Индустрии 4.0", сравнительный анализ типов фабрик будущего и их классификацию, анализ особенностей реализации "умных" фабрик в России, анализ этапов цифровой трансформации экономики, анализ проблем перехода в новую цифровую индустрию и их решения, разработку методов интеграции образования и производства в "Индустрии 4.0" с созданием "умных образовательных фабрик будущего" [3, 9–12].

Практическая значимость предложенных методик направлена на формализацию методов



интеграции образования и производства в концепции "Индустрии 4.0". В реализуемых образовательных "Фабриках будущего", технопарках, производственно-образовательных центрах и новых подходах к обучению заложено обучение высококачественных специалистов, необходимых в условиях четвертой индустриальной эволюции [2, 13—18].

#### Анализ положений концепции "Индустрия 4.0"

Возникшая в Германии концепция "Индустрия 4.0" привлекла серьезное внимание в научной среде [7]. Промышленное производство обусловлено глобальной конкуренцией и необходимостью быстрой адаптации к постоянно меняющимся требованиям рынка. Этим требованиям могут соответствовать только радикальные достижения в технологии производства.

"Индустрия 4.0" — перспективный подход, основанный на интеграции социальных и производственных процессов, а также интеграции всех участников цепочки создания стоимости компании (поставщиков, клиентов и т. п.) (рис. 1) [4, 5].

Технические аспекты этих требований выполняются с применением общих концепций киберфизических систем и промышленного "Интернета вещей" (IoT) к промышленным производственным системам [17—27].

#### Анализ технологии цифрового инструментального производства и ее использование в "Индустрии 4.0"

В основе четвертой индустриальной эволюции лежит симбиоз цифровых технологий и нововведений, необходимых для технологической

цифровой трансформации [1]. Проанализируем несколько примеров, показывающих разнообразные технологии, являющиеся ключевыми для фабрик будущего [6].

*AR технологии и HMI (Augmented Reality & Human-machine interface)* — системы дополненной реальности, поддерживающие людей в быстро меняющейся производственной среде. Предоставляя пространственную, заранее определенную информацию о задаче непосредственно в поле зрения пользователя, система может направлять пользователя через незнакомые задачи (например, сборку новых продуктов или модификаций) и визуализировать информацию непосредственно в пространственном контексте, где она актуальна. Уже существует первоначальный опыт работы с этой системой, её успешно применили несколько сотен пользователей, не имевших опыта в задаче сборки [28]. Дополненная реальность — ключевая часть HMI (human-machine interface). HMI — футуристическая технология, которая может иметь огромное влияние на "Индустрию 4.0".

Искусственный интеллект можно использовать в различных частях производства, и везде необходимо иметь поддерживающие технологии, идущие с "Индустрией 4.0" [8, 19].

Визуальные вычисления — это общий термин для всех дисциплин информатики, работающих с визуальными моделями и 3D-графикой. Визуальные вычисления играют ключевую роль в качестве "связующего фактора" в комплексных решениях [20].

Можно выделить следующие типы цифровых фабрик:

- цифровые;
- "умные";
- виртуальные.



Рис. 1. Взаимозависимость в системе логистики в рамках "фабрики будущего"

*Цифровые фабрики* имеют функции цифрового моделирования и проектирования, обеспечивающие проектирование и производство новейшей продукции от стадии исследования и планирования и до создания цифрового макета, "цифрового двойника", опытного образца или мелкой серии. Все результаты проектной деятельности находятся в цифре и в безбумажном производстве [21].

*"Умные" фабрики* — системы комплексных технологических решений, обеспечивающие в кратчайшие сроки производство продукции от заготовки до готового изделия; отличительными чертами является высокий уровень автоматизации и роботизации, исключающий человеческий фактор и связанные с ним ошибки. В качестве входного продукта "умных" фабрик, как правило, используют результаты работы "цифровых" фабрик [22].

*Виртуальные фабрики* — системы комплексных технологических решений, обеспечивающие в кратчайшие сроки проектирование и производство продукции за счет объединения "цифровых" и "умных" фабрик в распределенную сеть. Виртуальная фабрика подразумевает наличие информационных систем управления предприятием, позволяющих разрабатывать и использовать в виде единого объекта виртуальную модель всех организационных, технологических, логистических и прочих процессов на уровне глобальных цепочек поставок (поставки => производство => логистика => сбыт => обслуживание) и (или) на уровне распределенных производственных активов [22].

В результате системного и сравнительного анализа процесса реализации "умных" фабрик в

России по сравнению с другими развитыми странами можно установить следующие особенности.

Россия опоздала объявить курс на формирование "Индустрии 4.0". Первые упоминания концепции "умных" фабрик в международной научной литературе относятся к 2012 г. С 2014 г. ведущие развитые страны начали принимать стратегии формирования "Индустрии 4.0". В России официальный интерес к этой концепции проявился только в 2017 г. [23]. SWOT-анализ реализации "умных" фабрик в России представлен в таблице.

Процесс реализации "умных" фабрик в России имеет свою специфику. Несмотря на то что Россия опоздала по сравнению с другими развитыми странами провозгласить курс на формирование "Индустрии 4.0", государственная программа в этой сфере более детальна. Подготовлен наиболее реалистичный прогноз, позволяющий осуществлять высокоэффективное управление и мониторинг процесса реализации "умных" фабрик в России [9].

Однако проблемы на пути становления "Индустрии 4.0" в России включают акцент на цифровую экономику вместо "Индустрии 4.0", незавершенность процесса формирования социально-экономической платформы (цифровое общество и цифровая экономика) и удаленность частного бизнеса [10] от финансирования и управления научно-исследовательскими и предпринимательскими проектами в сфере промышленности "Индустрии 4.0". Перспективные решения этих проблем следует искать в дальнейших исследованиях в данной области.

SWOT-анализ реализации "умных" фабрик в России

Категории	Подкатегории	Описание
S	Сильные стороны реализации "умных" фабрик в России	Признание необходимости формирования "умных" фабрик на государственном уровне. Государственное финансирование промышленности 4.0
W	Слабые стороны реализации "умных" фабрик в России	Отсутствие формирования социально-экономической платформы (цифровое общество и экономика). Неразвитость института государственно-частного партнерства
O	Возможности и перспективы реализации "умных" фабрик в России	Дальнейшая оцифровка социально-экономической системы. Развитие института государственно-частного партнерства
T	Угрозы и риски реализации "умных" фабрик в России	Неисполнение программы оцифровки социально-экономической системы. Угроза информационной безопасности цифровой экономики
Факторы геополитического и социально-демографического характера	Угрозы	Угроза санкционных мер для российской промышленности "Индустрии 4.0". Угроза нарастания социальных противоречий в российском обществе
	Риски	Риск замедления процесса реализации "умных" фабрик из-за противодействия внешних торговых партнеров. Риск социальной оппозиции к изменениям, связанным с формированием "Индустрии 4.0"
	Возможности	Поддержка внешних торговых партнеров. Социальное одобрение процесса формирования "Индустрии 4.0"

### Методика перехода от дискретной к "умной" экономике

*Цифровая трансформация* — это фундаментальное переосмысление модели организации (от бизнес-модели и бизнес-процессов до источников финансирования и привлечения талантов), для которого цифровые технологии являются лишь катализатором, а нецифровые аспекты становятся ключевыми, определяя успех реализуемых инноваций, перехода на новые бизнес-модели и скорость реакции на внешние изменения [11, 24].

Проанализируем этапы цифровой трансформации.

*Первый этап* направлен на определение ценностей (Defining Values), включая формирование четкого обоснования необходимости преобразований, определение ключевой команды от высшего и среднего момента, установку организационного объема преобразований и выделение инвестиций (финансовых и человеческих) компаний на реализацию соответствующей программы [12].

*Второй этап*, направленный на запуск и ускорение программы трансформации (Launch and Acceleration), призван исключить ситуацию отката преобразований, обеспечить сохранение импульса трансформационных усилий и обеспечение первых значимых результатов, которые позволят окончательно убедить основную массу сотрудников организации в необходимости и неотвратимости цифровой трансформации.

*Третий этап* должен быть сфокусирован на масштабировании (Scaling Up). Как правило, до него компании доходят после порядка 18 месяцев реализации программы трансформации и к этому моменту имеют накопленный опыт, который им следует использовать для вывода всех инициатив программы трансформации на новый уровень, а также обеспечения закрепления всех новых практик в операционной, рутинной деятельности организации.

### Анализ проблемы перевода в новую цифровую индустрию и пути их решения

Открытие новых технологий от парового двигателя до Интернета вещей приводит индустрию к необходимости реагировать, приспосабливаться к новому. Возникают проблемы, связанные с непредсказуемостью, гибкостью и устойчивостью к неожиданным ситуациям [13, 25, 26]. Приведем некоторые из них, связанные с "Индустрией 4.0", и пути их решения.

Интеллектуальный механизм принятия решений и ведения переговоров: в "умном" производстве нужно перейти к принципу 3К (компания—клиенты—конкуренты), реализованному через базу данных; это упростит поиск

производителей для клиента и ускорит процесс разработки ТУ, что позволит системе быть полностью автономной.

Высокоскоростные протоколы IWN (Industrial Wireless Network): используемые протоколы беспроводной индустриальной сети не обеспечивают пропускную способность, достаточную для интенсивности и объемов информации, необходимую для "Индустрии 4.0"; разработка новых протоколов и железа к ним, а также распространение этих технологий на всю промышленность.

Big Data и аналитика в сфере производства: обеспечение высокого качества и целостности данных производственного процесса — серьезный вызов, типы собираемых данных все разнообразнее, структуры хранилищ сложнее, для работы с такими данными нужны специалисты, а в будущем — специализированный искусственный интеллект [29, 30].

Моделирование и анализ системы: согласно общей самоорганизованной теории самоорганизующийся процесс может привести к неожиданным хаотичным ситуациям. Таким образом, необходимо смоделировать самоорганизующуюся производственную систему, вывести ее динамические уравнения и определить соответствующие методы управления.

Кибербезопасность: "умная" фабрика сталкивается с большими проблемами безопасности, чем любой другой проект, зависящий от Интернета. Без соответствующей кибербезопасности невозможно представить себе эксплуатацию "умных" фабрик, "Индустрия 4.0" призывает к хранению огромного количества информации, ее использованию, а подобные данные могут быть уязвимы для хакеров, что может привести к катастрофическим последствиям; оборудование и другие физические объекты соединены с облаком, и изменение их поведения может привести к прямому ущербу имуществу и приостановке работы. Существующие технологии, такие как шифрование и авторизация, будут, несомненно, использованы в "Индустрии 4.0", однако их недостаточно.

Модульные и гибкие способы производства. При обработке продукта распределенное принятие решений объединяет группу ресурсов — это оборудование для подготовки, испытания или транспортировки. Таким образом, требуется, чтобы все физические артефакты могли работать вместе. Во-первых, все конвейерные системы должны иметь возможность передавать продукты между двумя машинами. Во-вторых, функции для автоматического позиционирования, зажима и программирования должны быть интегрированы в систему. Поэтому необходимо разработать модульные и интеллектуальные устройства транспортировки, которые могут динамически переконфигурировать производственные маршруты.

### Интеграция образования и производства в "Индустрии 4.0"

Одна из ключевых проблем перехода к индустрии будущего — обучение новых специалистов. Система образования, основанная на потребностях второй промышленной революции, во многих отношениях все еще существует.

Чтобы это изменить, необходимо пересмотреть образовательные парадигмы и сосредоточиться на тех областях, которые требуют переосмысления. В мире быстро меняющихся технологий и информационной перегрузки студенты должны учиться самостоятельному нахождению и усваиванию знаний. Понятно, что учащиеся не похожи друг на друга, не имеют одинаковой отправной точки, могут по-разному учиться, воспринимать разные области знаний и должны развивать свои навыки, а не обучаться набору заранее определенных данных. Образование 4.0 должно соответствовать промышленности 4.0 и подготавливать учащихся к следующей промышленной революции. Эту проблему должен решить новый подход к образованию.

"Образовательные фабрики будущего" ("Образование 4.0", также называемое передовым образованием) — технологическая платформа, нацеленная на развитие навыков и формирование компетенций для новой эры производства [2, 14–16]. Эта система образования направлена на создание устойчивой среды для обучения будущих сотрудников, которая будет соответствовать требованиям "Индустрии 4.0". Во вза-

имодействии высших образовательных учреждений с фабриками будущего скрыт большой потенциал. На рис. 2 приведены потенциальные области знаний, помогающие сопоставить индустрию и образование в новой системе [17, 18, 27].

Многие компании сталкиваются со следующей проблемой: множество технологий, составляющих "Индустрию 4.0", доступно, но большая часть сотрудников не готова к их использованию. Поэтому учебные фабрики могут внести существенный вклад в понимание "Индустрии 4.0", обучая студентов и сотрудников. Сценарии, связанные с рабочим местом, могут быть составлены на основе практического обучения [3]. Этот процесс позволяет участникам передавать полученные знания непосредственно на собственное рабочее место. "Индустрия 4.0" несет в себе множество уникальных особенностей для отдельного сотрудника. Практика показывает, что распространение учебных фабрик ускоряет внедрение новейших технологий.

Менее радикальный способ введения элементов "Образования 4.0" — интеграция макетов производства в подготовку специалистов. Деловые игры — метод имитации принятия решений ведущих специалистов на реальном производстве. Моделируя теоретическую "фабрику будущего", студенты изучают реальные принципы, лежащие в основе четвертой индустриальной революции.

Человек в "Индустрии 4.0" — ключевая часть производственного процесса, и его компетентность — необходимое условие успеха.

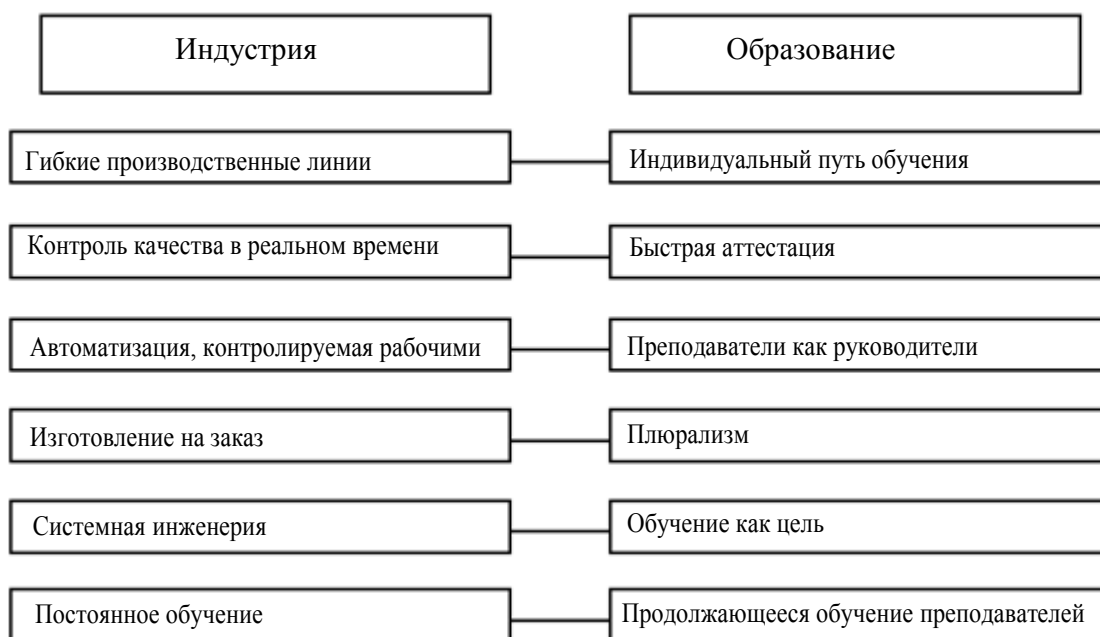


Рис. 2. Сопоставление требований индустрии с образованием

### Заключение

Скорость развития производства увеличивается почти экспоненциально. Поэтому новейшие типы фабрик, технологии и методы, рассмотренные в данной работе, крайне актуальны для любого технического специалиста. Определение возможных проблемных мест имплементации "Индустрии 4.0", как в России в частности, так и в мире в целом, позволяет прогнозировать и строить теории для быстрого и плавного развития промышленности.

### Литература

1. Cheng G.-J., Liu L.-T., Qiang X.-J., Liu Y. Industry 4.0 Development and Application of Intelligent Manufacturing: International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI), 2016.
2. Prinz C., Morlock F., Freith S., Kreggenfeld N., Kreimeier D., Kühlenkötter B. Learning Factory Modules for Smart Factories in Industrie 4.0 // *Procedia CIRP*. 2016. № 54. P. 113—118.
3. Simons S., Abé P., Naser S. Learning in the AutFab — The Fully Automated Industrie 4.0 Learning Factory of the University of Applied Sciences Darmstadt // *Procedia Manufacturing*. 2017. № 9. P. 81—88.
4. Шахнов В. А., Курносенко А. Е. Моделирование цифрового производства электронной аппаратуры в рамках концепции "Индустрия 4.0": мат. I Междунар. науч.-практ. конф. "Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии" / Отв. ред. Акбердина В. В. 2019. С. 585—594.
5. Левин И. В., Курносенко А. Е., Машина Н. А. Решения для проектирования, моделирования и оптимизации производств электронной аппаратуры // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 1 (169). С. 26—32.
6. Санталов Г. Д., Муравьев К. А., Леонидов В. В. Методика проектирования электронных устройств в концепции "Интернета вещей" // Проектирование и технология электронных средств. 2019. № 1. С. 10—22.
7. Хель И. Индустрия 4.0: что такое четвертая промышленная революция? [Электронный ресурс]. URL: <https://hi-news.ru/business-analitics/industriya-4-0-cto-takoe-chetvertaya-promyshlennaya-revolyuciya.html> (дата обращения: 12.05.2020).
8. Lee J., Davari H., Singh J., Pandhare V. Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-based Manufacturing Systems // *Manufacturing Letters*. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. 2018.
9. Stroiteleva T. G., Kalinicheva E. Y., Vukovich G. G., Osipov V. S. Peculiarities and Problems of Formation of Industry 4.0 in Modern Russia // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2018. P. 145—153.
10. Bogoviz A. V., Osipov V. S., Chistyakova M. K., Borisov M. Y. Comparative Analysis of Formation of Industry 4.0 in Developed and Developing Countries // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2018. P. 155—164.
11. Wang S., Wan J., Li D., Zhang C. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook // *International J. Distributed Sensor Networks*. 2016. Article ID 3159805.
12. Арабов Д. И., Верясова А. Ю., Гриднев В. Н. Комплексное макетирование узлов вычислительной техники с использованием инфраструктуры цифрового производства (FAB-LAB) в условиях сквозного обеспечения качества: тр. Междунар. симпозиума "Надежность и качество". 2016. Т. 1. С. 189—192.
13. Erol S., Jøger A., Hold P., Ott K., Sihn W. Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production // *Procedia CIRP*. 2016. № 54. P. 13—18.
14. Baena F., Guarín A., Mora J., Sauza J., Retat S. Learning Factory: The Path to Industry 4.0. // *Procedia Manufacturing*. 2017. № 9. P. 73—80.
15. Schallock B., Rybski C., Jochem R., Kohl H. Learning Factory for Industry 4.0 to provide future skills beyond technical training // *Procedia Manufacturing*. 2018. № 23. P. 27—32.
16. Karre H., Hammer M., Kleindienst M., Ramsauer C. Transition towards an Industry 4.0 State of the LeanLab at Graz University of Technology // *Procedia Manufacturing*. 2017. № 9. P. 206—213.
17. Yudin A. V., Shakhnov V. A., Usov K. A., Vlasov A. I., Salmina M. A. Design methods of teaching the development of internet of things components with considering predictive maintenance on the basis of mechatronic devices // *International J. Applied Engineering Research*. 2017. V. 12. № 20. P. 9390—9396.
18. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Картирование потока создания ценностей в концепции "Бережливое производство" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 2 (162). С. 23—27.
19. Prinz C., Morlock F., Freith S., Kreggenfeld N., Kreimeier D., Kühlenkötter B. Learning Factory Modules for Smart Factories in Industrie 4.0 // *Procedia CIRP*. 2016. № 54. P. 113—118.
20. Muhuri P. K., Shukla A. K., Abraham A. Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2019. № 78. P. 218—235.
21. Власов А. И. Концепция визуального анализа сложных систем в условиях синхронных технологий проектирования // Датчики и системы. 2016. № 8—9 (206). С. 19—25.
22. Национальная технологическая инициатива. Многоуровневая структура фабрик будущего [Электронный ресурс]. URL: <https://technet-nti.ru/article/fabriki-budushchego>
23. Королев И. Путина просят построить для России "фабрики будущего". Что это такое, и зачем они нужны [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cnews.ru/news/top/2017-08-14\\_putina\\_prosyat\\_postroit\\_dlya\\_rossii\\_fabriki\\_budushchego](https://www.cnews.ru/news/top/2017-08-14_putina_prosyat_postroit_dlya_rossii_fabriki_budushchego) (дата обращения: 14.08.2017).
24. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 № 1632-р.
25. Власов А. И., Карпунин А. А., Фатхутдинов Т. М., Прудцус А. А., Узенков Д. А. Анализ технологических трендов развития корпоративных информационных систем в условиях цифровизации производства: мат. I Междунар. науч.-практ. конф. "Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии" / Отв. ред. Акбердина В. В. 2019. С. 490—501.
26. Smith R. G. The contract net protocol: high level communication and control in a distributed problem solver // *IEEE Transactions on Computers*. 1980. V. 29. № 12. P. 1104—1113.
27. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Система 5S-технология создания эффективного рабочего места в концепции "Бережливое производство" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1 (161). С. 65—68.
28. Paelke V. Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0. environment: Proc. of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA). 2014.
29. Карпунин А. А., Власов А. И. Обработка данных с распределенным реестром в концепции "Индустрия 4.0": мат. V Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов "Энергосбережение и эффективность в технических системах". 2018. С. 120—121.
30. Власов А. И., Новиков П. В., Ривкин А. М. Особенности планирования воздушного движения с использованием синоптических карт, построенных с применением технологий BIG DATA // Вестник Московского государственного технического университета им. Баумана Н. Э. Сер. "Приборостроение". 2015. № 6 (105). С. 46—62.



---

## ANALYSIS OF INTEGRATION OF "FACTORIES OF THE FUTURE" TECHNOLOGY AND "INDUSTRY 4.0"

L. V. Zhuravleva, V. D. Kirilin, P. O. Repnikov, M. A. Usyukin  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*This article provides an overview and analysis of factories of the future and the transition to industry 4.0. A study of a number of scientific papers and articles on this topic. A little understanding of the factories of the future in the Russian scientific community is revealed. In this regard, the main objective of this article is to review the "smart" factories and their specifics in Russia. The classification of various types of factories and various technologies that are used in industry 4.0 are considered. The mechanism of transition from a discrete factory to a smart one is described in detail, and the problems of transferring to a new industry are examined. Unique ways of interaction between the work of manufactories and education are considered. The technologies considered in the article are currently being integrated into modern production. The stages of digital transformation are formed for the transition to "smart" factories and solutions to possible problems in integration are advanced.*

**Keywords:** industry 4.0, factories of the future, digital factories, smart factories, virtual factories, cyber physical systems, educational digital factories.

---

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

E-mail: fogel09@mail.ru

**Кирилин Вадим Дмитриевич**, бакалавр кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: neytrino450@gmail.com

**Репников Павел Олегович**, бакалавр кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: rtfiof@gmail.com

**Усюкин Михаил Александрович**, бакалавр кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: miguelus@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 13 мая 2020 г.*

УДК 615.471

## МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОГО АНАЛИЗА И ПРИНЦИПОВ РАЗРЕШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОТИВОРЕЧИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СРЕДСТВ ПУЛЬСОКСИМЕТРИИ

Е. В. Резчикова, канд. техн. наук; М. А. Сафаров

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

*Разработаны средства мониторинга сердечного ритма и уровня насыщенности крови кислородом (пульсоксиметров). Основное внимание уделено применению для этих целей инструментов теории решения изобретательских задач (ТРИЗ). Подробно проанализирована задача обеспечения достоверности измерений пульсоксиметра. Для ее решения применены причинно-следственный анализ и принципы разрешения технических противоречий. В результате предложен ряд технических решений, обеспечивающих увеличение достоверности измерений пульсоксиметра. Даны рекомендации по применению разработанных решений.*

**Ключевые слова:** причинно-следственный анализ, ТРИЗ, генерация решений, пульсоксиметрия, сердечный ритм, измерения, мониторинг.

Причинно-следственный анализ — это структурированный метод решения изобретательских задач, направленный на нахождение вероятных ключевых причин возникновения нежелательных эффектов в устройстве. Авторами проведен причинно-следственный анализ задачи по обеспечению достоверности измерений пульсоксиметра. Для ее решения выполнена последовательная декомпозиция причин нежелательных эффектов и произведен анализ каждой из причин, открытых на заключительном этапе декомпозиции. По каждой из этих причин выдвинуто предложение по ее устранению. Возникшие технические противоречия решены с использованием методов ТРИЗ [1].

Одним из основных инструментов, дополняющих причинно-следственный анализ технических систем, является визуализация причинно-следственных связей при помощи ментальных карт [2]. Их применение позволяет задействовать большее количество мозговых центров по сравнению с работой с чистым текстом, что ведет к ускоренному решению технических задач. Получаемые в результате причинно-следственного анализа решения также нуждаются в визуальном представлении, что важно для облегчения их восприятия и дальнейшего использования [3].

В результате применения причинно-следственного анализа зачастую возникают технические противоречия между требованиями к потребительским параметрам от разных нормативных систем. На их устранение направлен набор принципов, предложенный автором ТРИЗ Г. С. Альтшуллером. Данные принципы можно разделить на 4 группы: преобразующие вещество; использующие физические эффекты; совершенствующие техническую систему и снижающие затраты; устраняющие вредные факторы [4]. На использовании принципов разрешения технических противоречий, а также других инструментов ТРИЗ основано множество запатентованных изобретений [5]. Инструменты ТРИЗ могут быть использованы для анализа

как устоявшихся в уровне техники технических систем, так и сверхсовременных устройств, примером чего может служить применение функционального анализа для разработки контроллера сбора данных в концепции Интернета вещей [6]. Методы ТРИЗ и инструменты визуального системного анализа находят применение не только в разработке устройств, но и в разработке технологических процессов [7]. Так, их применение позволило разработать стратегию контроля в технологии поверхностного монтажа [8].

Для успешного применения причинно-следственного анализа и методов разрешения технических противоречий необходимо быстро проверять на практике гипотезы, возникающие в процессе решения задач. В разработке электронной аппаратуры этого достигают с помощью цифрового прототипирования, функции которого могут быть выполнены центрами цифрового инструментального производства, которые обеспечивают относительную легкость и дешевизну производства пробных изделий.

*Практическая значимость* полученных в работе результатов состоит в увеличении достоверности измерений пульсоксиметра, что может быть использовано для непрерывного мониторинга ритмов сердечно-сосудистой системы [9], экспресс-оценки и мониторинга состояния организма человека [10], выделения ритмов в сигналах медико-биологического происхождения [11], медико-диагностических экспертных систем оценки адаптивной реакции организма на воздействие экстремальных факторов [12], систем самодиагностики человека [13] и ряда других задач.

### Методика применения причинно-следственного анализа

Известен пульсоксиметр, представляющий собой модуль датчика, соединенный кабелем с блоком управления. Пространственная модель

его обобщенного варианта реализации показана на рис. 1. Примером пульсоксиметра, соответствующего данному обобщенному варианту реализации, является NONIN 3150 (США) [15].



Рис. 1. Пространственная модель обобщенного варианта реализации пульсоксиметра [14]

Как подчеркивают С. В. Каков и В. П. Мулер в своей работе "Пульсоксиметрия": "Точность измерений пульсоксиметра максимальна при значениях сатурации 70—100 % ( $\pm 2$  %); при насыщении гемоглобина  $O_2$  от 69 до 50 % погрешность составляет  $\pm 3$  %. Стандартное отклонение  $\pm 2$  % означает, что лишь в 68 % случаев  $SpO_2$  находится в пределах  $\pm 2$  % от истинного значения, а в 95 % случаев — не менее  $\pm 4$  %. Т. е. в 5 % случаев пульсоксиметр (ПМ) может показывать  $SpO_2 = 90$  % при истинной величине  $SpO_2 = 85$  %" [16]. В то же время для ряда медицинских целей необходима высокая точность результатов измерений уровня насыщенности крови пациента кислородом. Таким образом, необходимо развитие технической системы пульсоксиметра в части обеспечения точности его измерений.

Для решения задачи по обеспечению достоверности измерений пульсоксиметра на первом этапе причинно-следственного анализа технические характеристики системы разделены на причины и следствия. Дерево причин и следствий представлено на рис. 2.

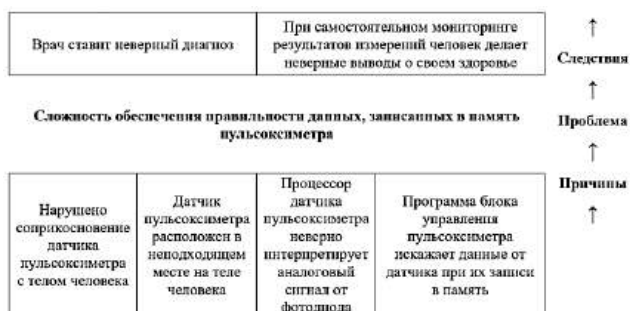


Рис. 2. Дерево проблем, причин и следствий задачи по обеспечению достоверности измерений пульсоксиметра

Вероятными причинами возникновения недостоверных данных, получаемых при измерении пульсоксиметром, являются:

- нарушение контакта датчика с телом человека (воздушное окно препятствует прохож-

дению светового потока между датчиком пульсоксиметра и телом человека, а также способствует внесению искажений от сторонних источников света);

- неверная интерпретация датчиком сигнала от фотодиода (сбой на любом из этапов усиления аналогового сигнала от фотодиода, его преобразования в цифровой сигнал, обработки этого цифрового сигнала ведет к уменьшению достоверности измерений);

- искажение программой блока управления данных, получаемых от датчика пульсоксиметра, при записи их в память (программа блока управления преобразует данные от датчика, сбой в ее работе неизбежно ведет к недостоверным данным);

- неподходящее расположение датчика на теле человека (важно корректное расположение датчика на теле человека, чтобы световой поток от датчика проходил через достаточное количество капиллярной крови).

На втором уровне декомпозиции развернуты гипотезы об открывшихся на первом уровне декомпозиции причинах неточности измерений пульсоксиметра.

Гипотезы о причинах нарушения соприкосновения датчика пульсоксиметра с телом человека представлены на рис. 3.

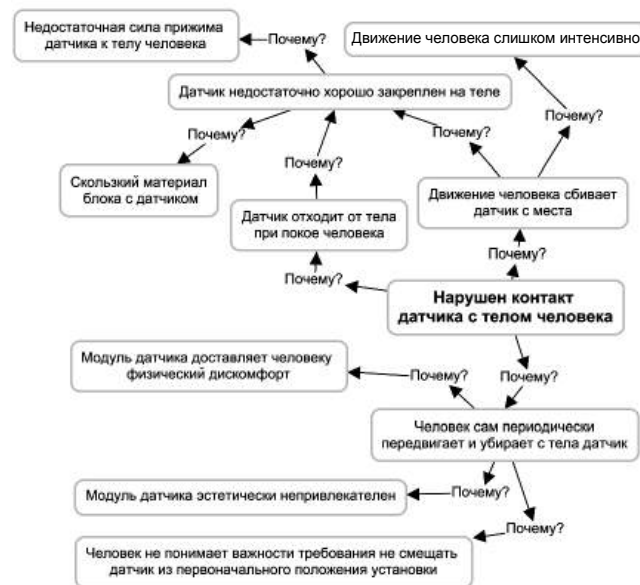


Рис. 3. Декомпозиция причин нарушения соприкосновения датчика пульсоксиметра с телом человека

Рассмотрим каждую из выявленных причин нарушения соприкосновения датчика пульсоксиметра с телом человека и сделаем выводы:

- движения человека слишком интенсивны (при испытаниях опытного образца следует определить предельную интенсивность движений человека, при которой измерения пульсоксиметра останутся верными, и обозначить ее в инструкции по эксплуатации);

- недостаточная сила прижима датчика к телу человека (сила прижима датчика к телу человека должна быть как можно больше. В то же время это доставит человеку физический дискомфорт. Данное техническое противоречие будет рассмотрено далее);

- скользкий материал блока с датчиком (блок с датчиком пульсоксиметра следует выполнять из нескользкого материала);

- модуль датчика доставляет человеку физический дискомфорт (чтобы человек не передвигал и не снимал с тела модуль датчика, доставляемый им физический дискомфорт должен быть минимальным);

- модуль датчика эстетически непривлекателен (чтобы человек не снимал датчик пульсоксиметра, он должен выглядеть привлекательно);

- человек не понимает важности требования не смещать датчик из положения установки (при выдаче пациенту пульсоксиметра важно провести методическую работу, объясняя важность выполнения данного требования для эффективного исследования).

Гипотезы о причинах неверной интерпретации аналогового сигнала от фотодиода процессором датчика пульсоксиметра представлены на рис. 4.

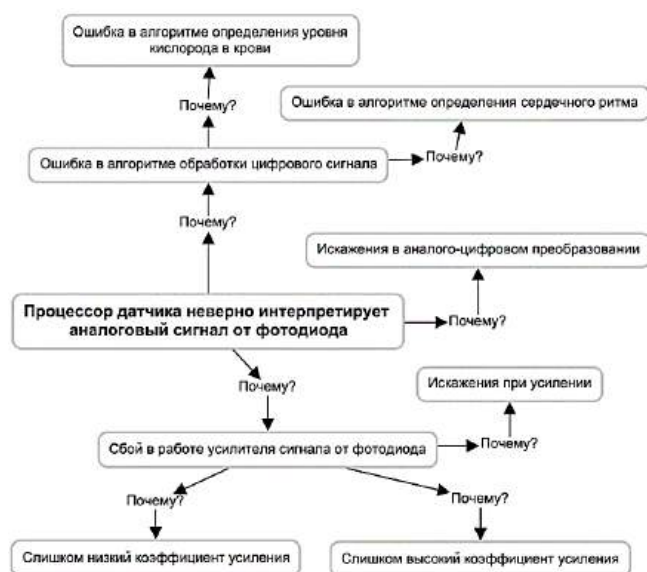


Рис. 4. Декомпозиция причин неверной интерпретации аналогового сигнала от фотодиода процессором датчика

Рассмотрим каждую из открывшихся причин неверной интерпретации аналогового сигнала от фотодиода процессором датчика пульсоксиметра и сделаем выводы:

- ошибка в алгоритмах определения сердечного ритма и уровня насыщенности крови кислородом (правильность данных алгоритмов следует подтвердить, используя математическое и компьютерное моделирование, а также в условиях эксперимента);

- искажения в аналогово-цифровом преобразовании (важно правильно выбрать вид и разрядность АЦП, который преобразует аналоговый сигнал от датчика пульсоксиметра);

- искажения при усилении сигнала от фотодиода (важно правильно выбрать элементную базу, вид и параметры усилителя сигнала от датчика пульсоксиметра);

- неверный коэффициент усиления сигнала от фотодиода (коэффициент усиления должен быть подобран таким образом, чтобы максимальное значение выходного напряжения усилителя соответствовало максимальному входному напряжению АЦП).

Гипотезы о причинах искажения данных от датчика при их записи в память микроконтроллером представлены в виде диаграммы связей на рис. 5.



Рис. 5. Декомпозиция причин искажения данных от датчика пульсоксиметра при их записи в память блока управления

Рассмотрим каждую из выявленных причин искажения данных при их записи в память микроконтроллера и сделаем выводы:

- программа не соответствует структуре памяти микроконтроллера (важно обеспечить соответствие разрабатываемой программы организации памяти микроконтроллера, особенно в части выравнивания полей в структуре памяти);

- запись в используемую программой область памяти запрещена микроконтроллером (следует учесть наличие участков памяти, зарезервированных микроконтроллером под определенные системные задачи, и избежать записи в них данных);

- слишком редкая выборка и слишком грубое округление данных (частота дискретизации сигнала и параметры округления его цифрового представления должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить требуемую точность сохраняемых данных).

Гипотезы о причинах, связанных с неподходящим расположением датчика пульсо-



ксиметра на теле человека, представлены на рис. 6.



Рис. 6. Декомпозиция причин, связанных с неподходящим расположением датчика пульсоксиметра на теле человека

Рассмотрим каждую из выявленных причин, связанных с неподходящим расположением датчика на теле человека, и сделаем выводы:

- в данном месте тела толщина кожи слишком велика либо нет достаточного потока крови через мягкие ткани (в выбранном месте расположения датчика толщина кожи должна позволять световому потоку от датчика проникать в ткани человека, поток крови через мягкие ткани человека в этом месте должен быть достаточным);
- *из-за заболевания* в данном месте тела толщина кожи слишком велика (например, при гипертератозе) либо нет достаточного потока крови через мягкие ткани (например, при воспалении) (в таком случае датчик следует расположить в месте, не заданном заболеваниями, если оно отсутствует, следует рассмотреть инвазивную пульсоксиметрию);
- в данном месте тела плотность слоев между кожей и костью слишком велика либо кость находится слишком далеко от кожи (плотность мягких тканей в выбранном месте и близость кости к коже должны позволять световому потоку проходить вплотную до кости и, отражаясь от нее, поступать обратно на датчик).

#### Методика применения принципов разрешения технических противоречий

В результате причинно-следственного анализа обнаружены следующие причины нежелательного эффекта: *сила прижима датчика пульсоксиметра к телу человека является недостаточной; корпус датчика пульсоксиметра доставляет человеку дискомфорт*. Устранением первой причины является обеспечение наибольшего возможного прижатия датчика пульсоксиметра к телу человека, а устранением второй — сделать присутствие пульсоксиметра на теле человека неощутимым для него. Таким образом, имеем техническое противоречие, которое решается с помощью инструментов ТРИЗ.

**Операционное противоречие** — это ситуация, в которой изменение параметра ведет к улучшению одного потребительского свойства, но вызывает нежелательные эффекты, приводящие к ухудшению другого потребительского свойства [1, 17].

Схема операционного противоречия, рассматриваемого далее, представлена на рис. 7.

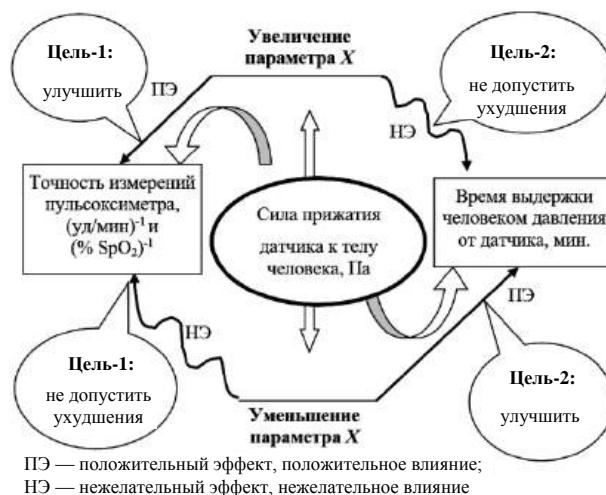


Рис. 7. Схема операционного противоречия, возникающего при изменении силы прижатия датчика пульсоксиметра к телу человека

Как видно из рисунка, увеличение силы прижатия датчика пульсоксиметра к телу человека вызывает увеличение точности измерений и вместе с тем уменьшение времени выдержки человеком давления от датчика. Уменьшение силы прижатия датчика пульсоксиметра, напротив, уменьшает точность измерений и увеличивает время выдержки человеком давления от датчика.

Цепочка причинно-следственных связей, представленная на рис. 8, позволяет систематизировать и наглядно представить взаимосвязь положительных и нежелательных эффектов.



Рис. 8. Цепочка причинно-следственных связей операционного противоречия



Полученная цепочка причинно-следственных связей позволяет поставить ряд частных задач по устранению нежелательных эффектов с сохранением полезного эффекта.

**Предметное противоречие** представляет собой два суждения, которые являются несовместимыми для данной технической системы. Его формулировка — это предельно обостренная и лаконичная формулировка задачи, которая объясняет, почему требования к устройству противоречивы и почему важно удовлетворить каждое из них. В предметном противоречии одна нормативная система требует наличия у устройства определенного свойства, что противоречит требованиям другой нормативной системы (рис. 9).

Схема предметного противоречия, возникающего при изменении силы прижатия датчика пульсоксиметра к телу человека, представлена на рис. 10.

Предметное противоречие в настоящей задаче можно сформулировать следующим образом.

**Суждение 1:** датчик пульсоксиметра должен иметь конструкцию, сильно прижимающую его к телу человека для того, чтобы обеспечить точность его измерений.

**Суждение 2:** датчик пульсоксиметра должен иметь конструкцию, которая не прикасается к телу человека и не создает давления, чтобы обеспечить удобство его ношения.

Получается, что процесс измерения пульсоксиметра охарактеризован двумя противоположными параметрами: *время выдержки датчика—точность измерений датчика* и *расстояние до поверхности кожи—точность измерений датчика*.

**Разрешение технического противоречия:** на основе разработанных Г. С. Альтшуллером принципов устранения технических противоречий [18] выдвинуты предложения о решениях противоречия "точность измерений датчика пульсоксиметра—время выдержки человеком датчика пульсоксиметра". Эти предложения представлены в таблице.

Рис. 9. Общая схема предметного противоречия



Рис. 10. Схема предметного противоречия "точность измерений пульсоксиметра—удобство ношения пульсоксиметра"

Технические решения операционного противоречия "точность измерений датчика пульсоксиметра—время выдержки человеком датчика пульсоксиметра"

Принцип ТРИЗ разрешения технического противоречия	Разработанное техническое решение	Результат применения технического решения
Местного качества	Часть корпуса пульсоксиметра, прилегающая к телу человека, состоит из мягкого, приятного на ощупь материала	Давление датчика на тело человека не вызывает дискомфорта, обеспечивается высокая точность измерений
Предварительного антидействия	При прикосновении к телу человека пульсоксиметр наносит на его кожу анальгетик, снижающий ее чувствительность в месте соприкосновения	Давление датчика пульсоксиметра на тело человека не вызывает дискомфорта, обеспечивается высокая точность измерений
"Матрешки"	Датчик пульсоксиметра располагают под кожей, непосредственно в мягких тканях человека	Давление датчика на кожу человека отсутствует, обеспечивается высокая точность измерений
Замены механической схемы	Датчик представляет собой видеокамеру, снимающую участок тела, и процессор, определяющий параметры кровеносной системы на основе алгоритмов обработки видеоряда	Давление датчика на кожу человека отсутствует, не возникает дискомфорта, обеспечивается высокая точность измерений
Использования гибких оболочек и тонких пленок	Датчик пульсоксиметра представляет собой тонкое гибкое устройство, которое приклеивают вокруг пальца человека, подобно пластырю, и измеряют параметры его кровеносной системы	Давление датчика на кожу человека отсутствует, высокая точность измерений достигается за счет плотного прилегания приклеенного датчика к коже человека
"Посредника"	Пульсоксиметр располагают на расстоянии от кожи человека, причем образуемый зазор заполнен гелем, улучшающим прохождение светового потока	Давление датчика на кожу человека отсутствует, точность измерений достигается за счет свободного прохождения света в мягкие ткани человека
Сфероидальности	Часть корпуса датчика пульсоксиметра, прилегающая к коже, имеет шарообразный корпус	Давление датчика на кожу не вызывает дискомфорта, при этом сохраняется высокая точность измерений
Универсальности	Датчики пульсоксиметра располагают на остриях массива игл, закрепленных в гибком полотне	Давление датчиков на кожу человека вызывает эффект аппликатора Кузнецова, что может быть использовано при лечении невралгий и других заболеваний [19]. При этом достигается высокая точность измерений датчика пульсоксиметра

Таким образом, в результате анализа операционного противоречия "точность измерений датчика пульсоксиметра—время выдержки человеком датчика пульсоксиметра", выдвинуто восемь возможных решений данного технического противоречия.

#### Оценка возможности применения технических решений

Применение следующих технических решений *целесообразно*, учитывая стоимость производства, безопасность для пользователя и существующий уровень техники:

- часть корпуса пульсоксиметра, прилегающая к телу человека, состоит из мягкого, приятного на ощупь материала;
- датчик представляет собой тонкое гибкое устройство, которое приклеивают вокруг пальца человека, подобно пластырю, и измеряют параметры его кровеносной системы;
- пульсоксиметр располагают на расстоянии от кожи человека, причем образуемый зазор заполняют гелем, улучшающим прохождение светового потока;
- часть корпуса датчика, прилегающая к коже, имеет шарообразный корпус;

- датчики пульсоксиметра располагают на остриях массива игл, закрепленных в гибком полотне, образуя таким образом аппликатор Кузнецова.

Применение следующих технических решений *нецелесообразно* из-за потенциального вреда организму человека:

- при прикосновении к телу человека пульсоксиметр наносит на его кожу анальгетик, снижающий чувствительность в месте соприкосновения: *длительное воздействие обезболивающих препаратов на нервную систему вызывает негативные эффекты* [20];
- датчик располагают под кожей, в мягких тканях человека (например, оперативным вмешательством): *есть риск отторжения организмом человека имплантата* [21].

Применение технического решения, в котором датчик пульсоксиметра представляет собой видеокамеру, осуществляющую съемку участка тела человека, и процессор, обрабатывающий видеоряд, пока *неосуществимо*, так как отсутствуют программные алгоритмы определения насыщенности крови человека кислородом по видеозаписи участка его тела, в отличие от алгоритмов определения сердечного ритма видеозаписи тела, которые известны [22].

### Анализ технического решения — гибкий модуль датчика пульсоксиметра с клейким слоем

Проанализируем одно из технических решений, разработанных в рамках данной работы, — гибкий модуль датчика пульсоксиметра с клейким слоем. Данное устройство приклеивают к пальцу человека, подобно пластырю, и измеряют параметры его кровеносной системы. Пространственная модель данной конструкции представлена на рис. 11.



Рис. 11. Пространственная модель конструкции тонкого гибкого модуля датчика пульсоксиметра с клейким слоем

Данное техническое решение обеспечивает пульсоксиметр следующими преимуществами перед аналогами. Во-первых, клейкий слой обеспечивает высокое сцепление модуля датчика пульсоксиметра с кожей человека, что ведет к *увеличенной точности измерения*. Во-вторых, из-за отсутствия пружинного прижимного механизма данное устройство обладает тонкой формой, что ведет к *увеличению удобства использования пульсоксиметра*.

Увеличение достоверности измерения сердечного ритма и уровня насыщенности кислородом крови, достигаемое за счет использования в пульсоксиметре данного технического решения, может быть полезно при проведении медицинских исследований, экспресс-оценке и непрерывном мониторинге состояния организма человека.

### Заключение

Представлена методика применения инструментов ТРИЗ для улучшения достоверности измерений пульсоксиметра. В процессе причинно-следственного анализа проведена последовательная декомпозиция причин возникновения ошибок в измерениях пульсоксиметра. Предполагаемые причины проанализированы, и по каждой сделано предложение о способах устранения.

Разрешено техническое противоречие, выявленное в процессе причинно-следственного анализа. Для этого обозначены системное и предметное противоречия, и на основе принципов Г. С. Альтшуллера выдвинуты и проанализированы предложения по их разрешению.

Разработанные технические решения могут быть применены в пульсоксиметрах медицинского, персонального и спортивного назначения.

Научная новизна проведенной работы заключается, во-первых, в *применении причинно-следственного анализа и принципов разрешения технических противоречий для решения задачи по обеспечению достоверности измерений пульсоксиметра*. Преимуществами данной методики по сравнению с решением задачи методом мозгового штурма являются большая глубина проработки проблемы и расширенный спектр получаемых решений, а также сокращенные расходы времени и средств на изготовление пробных изделий. Во-вторых, научная новизна заключается в разработке *технических решений для пульсоксиметров, которые отсутствуют в аналогах*. Преимуществом этих технических решений по сравнению с аналогами служит *увеличенная точность измерений пульсоксиметра с сохранением удобства его использования*.

### Литература

1. Ревенков А. В., Резчикова Е. В. Теория и практика решения технических задач: учеб. пособие. — М.: ФОРУМ, 2008.
2. Журавлева Л. В., Власов А. И. Визуализация творческих стратегий с использованием ментальных карт // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2013. № 1 (21). С. 133—140.
3. Власов А. И., Журавлева Л. В., Тимофеев Г. Г. Методы генерационного визуального синтеза технических решений в области микро-/наносистем // Научное обозрение. 2013. № 1. С. 107—111.
4. Резчикова Е. В., Власов А. И. Перспективы применения концепт-карт для построения базы знаний ТРИЗ: сб. докл. "ТРИЗ. Практика применения методических инструментов" / под ред. Яковенко С., Митрофанов В., Кудрявцев А., 2011. С. 140—145.
5. Охломенко И. В., Резчикова Е. В. Анализ методов улучшения конструктивной реализации программных клавиатур на основе инструментов ТРИЗ // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 1 (169). С. 33—37.
6. Щукин И. В., Резчикова Е. В. Функциональный анализ контроллера сбора данных в концепции Интернета вещей // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 1 (169). С. 38—42.
7. Власов А. И. Концепция визуального анализа сложных систем в условиях синхронных технологий проектирования // Датчики и системы. 2016. № 8-9 (206). С. 19—25.
8. Лебедев А. С., Резчикова Е. В. Стратегии проектирования операций контроля в технологии поверхностного монтажа для типовых ситуаций на производстве // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 3 (171). С. 36—41.
9. Андреев В. В., Сенько О. В. Программно-аппаратное обеспечение непрерывного мониторинга ритмов сердечно-сосудистой системы // Прикладная информатика. 2017. Т. 12. № 2 (68). С. 88—98.
10. Фролов Б. С., Овечкин В. В., Овечкина И. В. Экспресс-оценка и мониторинг функционального состояния организма и психического статуса человека по сердечному ритму // Вестник аритмологии. 2000. № 16. С. 72—77.
11. Анциперов В. Е., Зернов В. А., Растягаев Д. В. Использование техники аналитических спектров для задач автоматизации мониторинга сердечного ритма // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 8. С. 28—36.
12. Власов А. И., Конькова А. Ф. Медико-диагностические экспертные системы для оценки адекватности адаптив-

ной реакции организма на воздействие экстремальных факторов // Конверсия. 1995. № 9–10. С. 18–21.

13. Пугачев Е. К., Вишневская Ю. А. Проблемы систем самодиагностики // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. № 1. С. 80–86.

14. Ивлеев С. В., Тарасов А. А. Устройство для измерения уровня оксигенации и частоты пульса. Патент RU2294141C1 РФ, МПК A61B 5/145, A61B 5/02. № 2005125289/14. Опубл. 27.02.2007. Бюл. № 6. — 19 с.

15. Wristox2 Model 3150 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.invacare.com/doc\\_files/11-194.pdf](http://www.invacare.com/doc_files/11-194.pdf)

16. Каков С. В., Мулер В. П. Пульсоксиметрия // ВНМТ. 2006. № 1. С. 171–172.

17. Власов А. И., Журавлева Л. В., Резчикова Е. В., Макушина Н. В., Шахнов В. А., Чебова А. И. Онтология наноинженерии // Междунар. науч.-исслед. журнал. 2013. № 12–1 (19). С. 50–67.

18. Альтишуллер Г. С. Алгоритм изобретения // Московский рабочий. 1969. С. 111–138.

19. Коваль Д. Ипликатор Кузнецова. Избавление от боли в спине и шее. — М.: АСТ, 2014.

20. Yurt K. K., Kaplan S. As a painkiller: a review of pre- and postnatal non-steroidal anti-inflammatory drug exposure effects on the nervous systems // Inflammopharmacol. 2018. № 26. С. 15–28.

21. Бессонова Л. А., Полтанова Т. И. Клиническое наблюдение отторжения имплантата "Карботекстим-М" в отдаленном послеоперационном периоде // Точка зрения. Восток—Запад. 2014. № 2.

22. Poh M.-Z., McDuff D. J., Picard R. W. Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation // Opt. Express. 2010. № 10. P. 10762–10774.

## METHODS OF APPLICATION OF CAUSAL ANALYSIS AND TECHNICAL CONTRADICTIONS RESOLUTION PRINCIPLES FOR DESIGNING PULSE OXIMETERS

E. V. Rezchikova, M. A. Safarov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*The article is devoted to the pulse oximeters design process. It is focused on the use of the theory of the resolution of invention-related tasks in the context of the pulse oximeters design process. The task of ensuring the accuracy of data recorded in the pulse oximeter's memory is analyzed in detail. Causal analysis and principles of resolving technical contradictions have been applied to achieve the goal. As a result, several technical solutions are proposed to increase the accuracy of data recorded in the pulse oximeter's memory. These solutions differ from the technical solutions used in existing pulse oximeters. The conclusion provides recommendations on the application of the developed solutions.*

**Keywords:** causal analysis, theory of the resolution of invention-related tasks, generating solutions, pulse oximetry, heart rhythm, measurements, monitoring.

Резчикова Елена Викентьевна, доцент кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: rezc-elena@yandex.ru

Сафаров Мурат Альфредович, студент кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: murat.a.safarov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13 мая 2020 г.

УДК 621.791.46; 621.791.052.3

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ ПРОЦЕССОМ СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОСВАРНОГО ПЕРЕХОДА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Н. П. Старостин, д-р техн. наук; Р. С. Тихонов, канд. техн. наук  
ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
г. Якутск, Россия

А. С. Шишигина

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

*С применением методов информационных технологий разработана технология сварки с помощью редуцированного электросварного перехода полиэтиленовых труб разного диаметра для газопроводов при климатических температурах окружающего воздуха ниже нормативных. Показано, что при низких температурах воздуха обеспечить охлаждение зоны термического влияния по закономерности, характерной для сварки в условиях допустимых температур воздуха, можно предварительным подогревом с выравниванием температур и неравномерной теплоизоляцией внешней поверхности перехода.*

**Ключевые слова:** полиэтиленовые трубы, переход электросварной, электромуфтовая сварка, математическая модель, метод конечных элементов, фазовый переход, кристаллизация.

Существующая технология сварки полиэтиленовых (ПЭ) труб для газопроводов позволяет проводить сварочные работы при температурах окружающего воздуха (ОВ) от  $-15$  до  $+45$  °С. При температурах ниже регламентированных сварочные работы рекомендовано выполнять в помещениях (укрытиях), обеспечивающих соблюдение заданного температурного интервала. При этом необходимо термостатировать свариваемые концы труб при температуре в укрытии. Затраты времени на выполнение одного сварного соединения ПЭ-труб при температурах воздуха ниже допустимых по существующей технологии с использованием укрытий могут составлять 4—6 ч. В регионах холодного климата такие затраты времени на проведение сварочных работ недопустимы при проведении ремонтно-восстановительных работ на газопроводах. Даже достаточно кратковременное прерывание газоснабжения в зимних условиях может привести к катастрофическим последствиям в связи с аварией систем отопления. Актуальной является проблема разработки технологии оперативной сварки полиэтиленовых труб при низких температурах на открытом воздухе.

Одним из широко используемых методов соединения ПЭ-труб является сварка при помощи деталей с закладными нагревателями, к которым относятся муфты, седловые отводы, тройники, переходы и т. д. Разработка оперативной технологии сварки с помощью муфт с закладным нагревателем (электромуфтовая сварка) и технологии приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе при низких температурах с использованием методов информационных технологий описана в работах [1, 2]. Технология оперативной сварки при низких температурах включает операции предварительного подогрева

муфты и концов труб с использованием встроенного нагревателя до допустимой для сварки температуры, нагрев муфты и трубы в регламентированном режиме и охлаждение соединения под слоем теплоизоляции. Параметры сварки при этом определяют на основе математического моделирования и анализа динамики температурных полей в соединении при протекании теплового процесса по закономерностям, характерным для сварки в условиях допустимых температур воздуха.

При электромуфтовой сварке температурное поле в соединении не только осесимметрично, но и симметрично относительно плоскости, проходящей через середину муфты ортогонально оси соединяемых труб. Разработку технологии электромуфтовой сварки при низких температурах сводили к управлению тепловым процессом в соединении муфты с одной трубой. В данной работе рассмотрено соединение ПЭ-труб различного диаметра с помощью электросварного перехода при температурах ОВ ниже регламентированных нормативными документами. Отличительная особенность такой сварки состоит в одновременной сварке труб различного диаметра с помощью перехода. При такой сварке температурное поле в соединении имеет только осевую симметрию. Таким образом, для разработки технологии сварки перехода при низких температурах воздуха необходимо управлять процессом подогрева с помощью последовательно соединенных вмонтированных в тело перехода спиралей и процессом охлаждения перехода и труб различного диаметра и толщины стенок путем изменения толщин слоев теплоизоляционного материала.

При разработке технологий электромуфтовой сварки и приварки седлового отвода при темпе-



ратурах ниже нормативных в математической модели использовали функцию относительной кристалличности. Применение такой функции равнозначно принятию допущения о полной кристаллизации всего объема расплава полиэтилена. Кроме того, использовали объемные источники теплоты, что требовало дополнительного измельчения расчетной сетки при численном решении задачи. В математической модели теплового процесса сварки учитывали частичную кристаллизацию полиэтилена и использовали функцию сосредоточенного источника тепла.

Целью данной работы является разработка методики определения параметров сварки полиэтиленовых труб различного диаметра с помощью электросварного перехода при низких температурах окружающего воздуха на основе численного анализа динамики температурных полей.

### Математическая модель

Для определения динамики температурного поля при неразъемном соединении труб с помощью электросварного перехода рассмотрим осесимметричную задачу теплопроводности. Расчетная схема сварного соединения труб с переходом представлена на рис. 1.

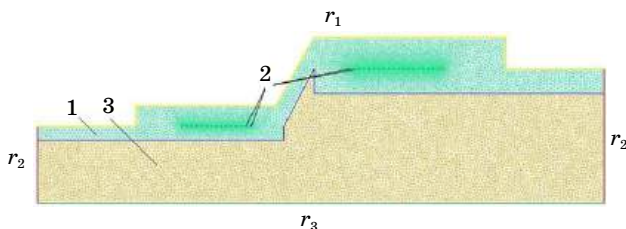


Рис. 1. Расчетная схема перехода с участками труб: 1 — стенки перехода и свариваемых труб; 2 — нагревательные элементы; 3 — область, наполненная воздухом

Обозначим через  $\Omega$  область стенок перехода и участков труб из полиэтилена. Известно, что при плавлении (кристаллизации) полиэтилена не существует четко выраженной границы раздела фаз: фазовое превращение происходит в интервале температур. Для адекватного описания теплового процесса с таким фазовым превращением в математической модели необходимо учитывать изменение кристалличности полиэтилена в зависимости от температуры. Для определения нестационарного температурного поля при сварке полиэтиленовых труб с помощью перехода запишем уравнение теплопроводности с учетом двухфазной зоны, в которой вещество находится как в твердом, так и в жидком состоянии [3, 4]:

$$\begin{aligned} & \left[ c(T) + \rho^{-} L^{100\%} \frac{dX_C}{dT} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{Q_1(T) - c_S \rho_S \frac{\partial T_{S1}}{\partial t} V_{S1}}{n_1 2\pi r} \delta(r - r_1) \times \\ & \times \sum_{i=1}^{n_1} \delta(z - z_i^B) + \frac{Q_2(T) - c_S \rho_S \frac{\partial T_{S2}}{\partial t} V_{S2}}{n_2 2\pi r} \delta(r - r_2) \times \\ & \times \sum_{i=1}^{n_2} \delta(z - z_i^L), \quad r, z \in \Omega, \quad 0 < t \leq t_m, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q_1, Q_2$  — мощности источников теплоты;  $L^{100\%}$  — удельная теплота фазового превращения полностью кристаллического полимера;  $X_C$  — степень кристалличности;  $c(T) = \rho^+ c^+ + X_C(T)(\rho^- c^- - \rho^+ c^+)$ ,  $\lambda(T) = \lambda^+ + X_C(T)(\lambda^- - \lambda^+)$ ;  $c^-, \rho^-, \lambda^-$  и  $c^+, \rho^+, \lambda^+$  — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фаз материала трубы соответственно;  $c_S, \rho_S$  — теплоемкость и плотность материала спиралей нагревателя;  $T_{S1}, T_{S2}$  — температуры в спиральях;  $V_{S1}, V_{S2}$  — объемы спиралей;  $n_1, n_2$  — количество витков спиралей;  $z_i^B, z_i^L$  — осевые координаты расположения витков в частях перехода с большим и малым диаметрами;  $r_1, r_2$  — радиусы намотки электронагревательных спиралей в теле перехода;  $\delta$  — дельта-функция Дирака.

Степень кристалличности  $X_C$  определяют по формуле

$$X_C(T) = \begin{cases} X_C^\infty, & T \leq T_1, \\ X_C^\infty - \frac{T_1}{L^{100\%} v_T} \int q(u) du, & T_1 < T < T_2, \\ 0, & T \geq T_2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $q(T)$  — зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК);

$X_C^\infty$  — предельная степень кристалличности исследуемого полимерного материала;

$v_T$  — скорость изменения температуры.

Дифференцируя по  $T$  интеграл по верхнему пределу и используя обозначение

$$\chi(T) = L^{100\%} \frac{dX_C}{dT} = \begin{cases} 0, & T \leq T_1, \\ \frac{-q(T)}{v_T}, & T_1 < T < T_2, \\ 0, & T \geq T_2, \end{cases} \quad (3)$$

выражение (1) запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left[ c(T) - \rho^- \chi(T) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{Q_1(T) - c_S \rho_S \frac{\partial T_{S1}}{\partial t} V_{S1}}{n_1 2\pi r} \delta(r - r_1) \times \\ & \times \sum_{i=1}^{n_1} \delta(z - z_i^B) + \frac{Q_2(T) - c_S \rho_S \frac{\partial T_{S2}}{\partial t} V_{S2}}{n_2 2\pi r} \delta(r - r_2) \times \\ & \times \sum_{i=1}^{n_2} \delta(z - z_i^L), \quad r, z \in \Omega, \quad 0 < t \leq t_m. \end{aligned} \quad (4)$$

Зададим для уравнения (4) начальные условия:

$$T(x, 0) = T_0, \quad (r, z) \in \Omega, \quad (5)$$

и граничные условия:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_0), \quad (r, z) \in \Gamma_1, \quad (6)$$

$$T = T_0, \quad (r, z) \in \Gamma_2, \quad (7)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (r, z) \in \Gamma_3, \quad (8)$$

совместно с уравнением теплопроводности для неподвижного воздуха внутри труб с граничными условиями вида (7) на концах труб и условием ограниченности решения при  $r = 0$ .

В начальном и граничных условиях использованы следующие обозначения:  $T_0$  — температура окружающего воздуха;  $\alpha$  — коэффициент конвективного теплообмена с воздухом.

Теплота поглощается при фазовом превращении кристаллической частью полиэтилена и выделяется при образовании и росте кристаллов. Поскольку полиэтилен кристаллизуется частично и доля кристаллической части не превышает предельного значения  $X_C^\infty$ , в (1) и (4) используют функцию степени кристалличности. При непосредственном использовании функции степени кристалличности не решается уравнение кинетики кристаллизации полимеров, как в работах [5–8]. При разработке технологии сварки при низких температурах воздуха необходимо обеспечить динамику температурного поля, свойственную при сварке в условиях допустимых температур, т. е. заданную закономерность изменения температур в зоне термического влияния. Особенностью сварки полимерных труб с

помощью деталей с закладными нагревателями является то, что в зоне сварки в результате температурного расширения материала возникает сварочное давление. Поскольку формирование надмолекулярных структур при сварке полимерных материалов в основном определяется закономерностями изменения температуры и сварочного давления в соединении, для получения качественного сварного соединения при таком методе сварки достаточно управлять только тепловым процессом. Необходимое давление и формирование структуры материала сварного шва будут обеспечены тепловым процессом. В этом случае отпадает необходимость использования функции кинетики кристаллизации.

### Результаты расчетов

Мощности источников теплоты в электро-сварном переходе вычисляли по формуле:

$$Q_i(T_S) = U_i^2 / R_i [1 + \beta(T_{Si} - 20)], \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

где  $R_i$  — сопротивление электронагревательных спиралей при температуре 20 °C;  $U_i$  — напряжение на участках цепи;  $\beta$  — температурный коэффициент сопротивления материала спиралей;  $T_{Si}$  — температура в точке расположения источника тепла  $i$ -й спирали.

Рассмотрено моделирование температурных полей при сварке полиэтиленовых труб ПЭ100 SDR 11 (отношение внешнего диаметра трубы к толщине стенки равно 11) с помощью перехода 110 × 63 SDR 11 и определение параметров сварки при температуре окружающего воздуха ниже нормативной (–40 °C), наиболее характерной в зимний период для регионов холодного климата. Свойства материала трубы и перехода: коэффициенты теплопроводности  $\lambda^- = 0,46$ ,  $\lambda^+ = 0,24$  Вт/(м·К); плотности  $\rho^- = 950$ ,  $\rho^+ = 800$  кг/м³; теплоемкости  $c^- = 1900$ ,  $c^+ = 2100$  Дж/(кг·К); для спирали  $\rho_S = 800$  кг/м³;  $c_S = 410$  Дж/(кг·К). При оплавлении  $v_T = 40$  °C/мин, при кристаллизации  $v_T = 17$  °C/мин. Последовательно соединенные нагревательные элементы расположены при радиусах  $r_1 = 0,056$ ,  $r_2 = 0,0325$  м. Количество витков спирали перехода  $n_1 = 20$ ,  $n_2 = 15$ . Полное напряжение  $U = 39,5$  В;  $R_1 = 1,0$ ,  $R_2 = 0,4$  Ом;  $U_1 = 28,2$ ,  $U_2 = 11,3$  В;  $\beta = 4,30 \cdot 10^{-3}$  1/°C. Продолжительность нагрева при регламентированном нормативными документами режиме сварки с помощью перехода составляет 130 с. Свойства воздуха брали из справочных данных и считали постоянными [9].

Задачу определения нестационарного поля в сварных соединениях (4)–(8) решали методом конечных элементов [10] с использованием программы свободного доступа Dolphin/FEniCS [11]. Триангуляцию вычислительной области выполняли с использованием генератора сетки Gmsh [12]. Визуализацию полученных результатов реализовывали с помощью пакета Paraview [13].

При проведении сварки труб различного диаметра с помощью перехода при температурах воздуха ниже нормативных все операции (предварительный подогрев, выравнивание температур, нагрев в регламентированном режиме и охлаждение) выполняют с теплоизоляцией внешней поверхности перехода. Предварительный подогрев осуществляют путем подачи невысокого напряжения на нагревательные элементы перехода. Выравнивание температур производят при отсутствии теплового источника. Для определения толщины слоя теплоизоляции из условия обеспечения охлаждения соединения по закономерностям, свойственным при сварке в условиях допустимых температур окружающего воздуха, проводили анализ теплового процесса сварки при различных толщинах слоя теплоизоляции. Для того чтобы расчетная область оставалась неизменной при варьировании толщины теплоизоляции на внешней границе перехода, вводили эффективный коэффициент теплообмена  $\alpha_{\text{эф}}$ , значение которого зависит от коэффициента теплообмена поверхности с воздухом  $\alpha$ , толщины  $h$  и теплопроводности  $\lambda_{\text{изол}}$  используемого теплоизоляционного материала. Значение  $\alpha_{\text{эф}}$  определяют из формулы

$$1/\alpha_{\text{эф}} = 1/\alpha + h/\lambda_{\text{изол}},$$

справедливой в случае тонкой стенки [14].

Небольшие толщины стенок трубы меньшего диаметра и соответствующей части перехода обуславливают более интенсивную теплоотдачу из зоны термического влияния в окружающую среду по сравнению с теплопередачей в трубе большего диаметра и соответствующей части перехода. В связи с этим для обеспечения требуемых темпов охлаждения материалов в зонах термического влияния соединений необходимо использовать различные толщины слоев теплоизоляции для каждой из двух частей перехода. Предполагая, что стенки труб и перехода в начале стадии оплавления имели однородную температуру 20 °С, путем расчетов определили толщины слоев теплоизоляции, равные 12 мм в части перехода с малым диаметром и 20 мм в части перехода с большим диаметром, необходимые для сварки при температуре окружающего воздуха — 40 °С.

Предполагая наличие слоев теплоизоляции с расчетными толщинами на внешней поверхности перехода, путем расчетов определили следующие параметры для предварительного подогрева: напряжение для подогрева 9,5 В; продолжительность подогрева 18 мин; продолжительность выравнивания температур 10 мин. На рис. 2 представлены распределения температур на стенках труб и перехода в моменты завершения стадий подогрева и выравнивания температур. В стенке перехода с меньшим диаметром максимальная температура достигает 48 °С, с большим диаметром — 42,6 °С.

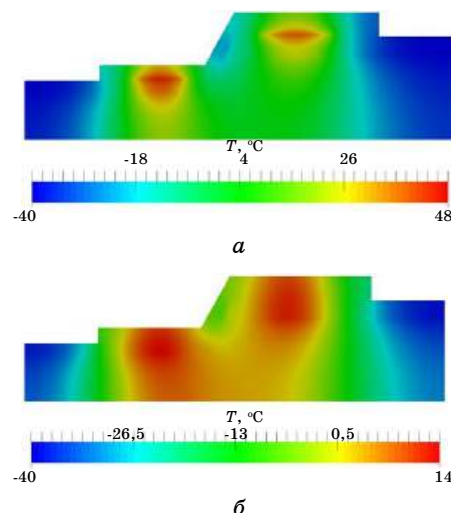


Рис. 2. Распределение температуры в стенках перехода с трубами и в воздухе внутри сварных соединений на стадиях предварительного подогрева и выравнивания температур:

а — в конце подогрева; б — в конце выравнивания температур

В конце стадии выравнивания температур в зонах термического влияния соединений устанавливаются практически однородные температуры из допустимого интервала для сварки полиэтиленовых труб, что позволяет произвести нагрев (оплавление) по режиму, регламентированному нормативными документами.

Термический анализ трубного полиэтилена с использованием ДСК показывает, что процесс кристаллизации завершается при температуре примерно 80 °С. Область, ограниченную такой изотермой, примем за зону термического влияния. На рис. 3 показаны зоны термического влияния в момент времени окончания нагрева (оплавления) в течение 130 с при сварке по регламентированному режиму в условиях допустимой температуры 7 °С и по предлагаемой технологии с предварительным подогревом и выравниванием температур при  $T_0 = -40$  °С.

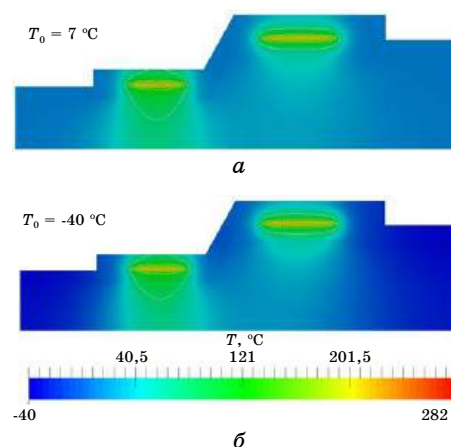


Рис. 3. Распределение температуры в стенках перехода с трубами и в воздухе внутри сварных соединений в момент времени 130 с нагрева:

а — при  $T_0 = 7$ ; б — при  $T_0 = -40$  °С (линии белого цвета показаны изотермы со значениями температур 80 и 130 °С)

Найденные расчетным путем параметры сварки (напряжение подогрева, продолжительность подогрева и выравнивания температур, толщины слоев теплоизоляции) обеспечивают практически такие же размеры зон термического влияния, как и при сварке в условиях допустимой температуры. При сварке в условиях допустимой и низкой температуры воздуха температурные поля соответствующих периферийных участков соединений будут отличаться. Это будет способствовать протеканию охлаждения зон термического влияния по различным закономерностям, несмотря на наличие теплоизоляции в одном случае. В силу низкой теплопроводности полимерного материала расхождение динамики температурных полей в зонах термического влияния начинает проявляться после истечения некоторого времени. Для сварного соединения важна идентичность закономерностей изменения температурных полей при допустимой и низкой температуре воздуха в период времени до завершения процесса кристаллизации материала сварного шва. После завершения кристаллизации небольшое различие тепловых режимов допустимо.

На рис. 4 продемонстрировано распределение температуры в сварных соединениях при сварке в условиях допустимой температуры воздуха  $7^\circ\text{C}$  и при сварке по предлагаемой технологии в условиях температуры воздуха  $-40^\circ\text{C}$  с предварительным подогревом, выравниванием температуры и теплоизоляцией в различные моменты времени.

Из рис. 4 видно, что границы кристаллизации в различные моменты времени охлаждения идентичны, что свидетельствует о протекании тепловых процессов при сварке в условиях низкой и допустимой температурах по одинаковым закономерностям. При такой динамике температурного поля в зоне термического влияния формируется структура материала, свойственная сварке при допустимой температуре.

На полном временном интервале процесса сварки идентичность тепловых процессов при температурах окружающего воздуха  $T_0 = 7$  и  $T_0 = -40^\circ\text{C}$  в точках в середине сварных швов перехода и труб большого и малого диаметров показана на рис. 5.

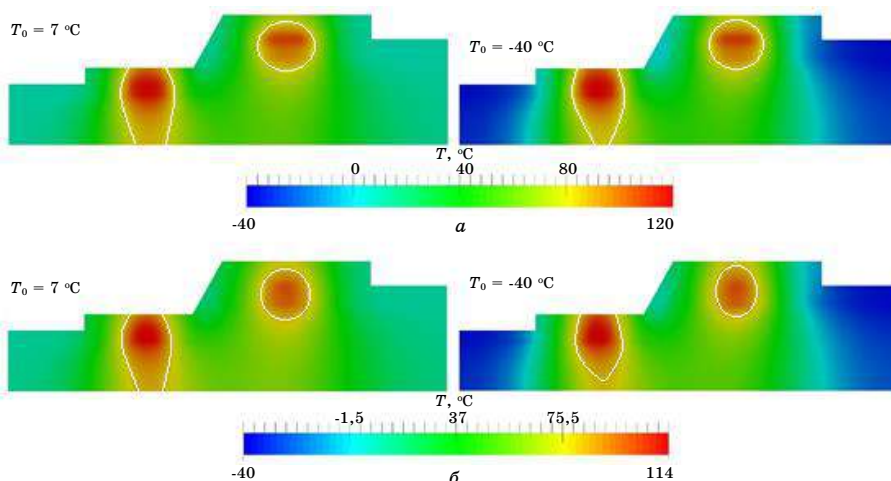


Рис. 4. Распределение температуры в сварных соединениях при различных температурах окружающего воздуха на стадии охлаждения в моменты времени  $t$ : а — 3 мин; б — 5 мин (линиями белого цвета показаны изотермы со значением температуры  $80^\circ\text{C}$ )

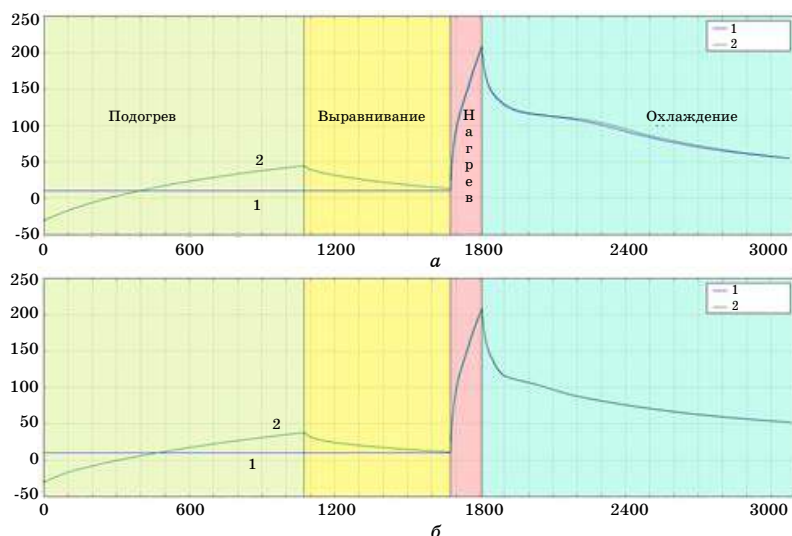


Рис. 5. Динамика изменения температуры по времени при  $T_0 = 7^\circ\text{C}$  (кривая 1) (стандартная сварка),  $T_0 = -40^\circ\text{C}$  (кривая 2) (по предлагаемой технологии) в точках внешних поверхностей труб с диаметрами: а — 63 мм; б — 110 мм

По приведенной методике можно рассчитать величины напряжений для предварительного подогрева, продолжительности предварительного подогрева и выравнивания температур, а также толщины слоев теплоизоляции для двух частей перехода при значениях температуры окружающего воздуха ниже нормативных для различных типоразмеров полиэтиленовых труб.

### Заключение

Методами информационных технологий установлено, что при сварке полиэтиленовых труб с помощью перехода при температуре воздуха ниже нормативной предварительный подогрев с расчетным напряжением и выравнивание температур с расчетными продолжительностями приводят в зоне термического влияния к распределению температуры, близкому к однородному со значением температуры из допустимого интервала.

Установлено, что последующий нагрев (оплавление) в регламентированном режиме и охлаждение под слоем теплоизоляции с расчетной толщиной обеспечивают протекание теплового процесса в зонах термического влияния соединений по закономерности, характерной для сварки в условиях допустимой температуры окружающего воздуха.

Работа выполнена в рамках Госзаказа ФАНО РФ  
(проект № АААА-А17-117040710038-8  
от 07.04.2017).

### Литература

1. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Конечно-элементное моделирование теплового процесса и расчет параметров электрофузионной сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 2. С. 69—75.
2. Старостин Н. П., Васильева М. А., Андреев Б. И. Определение технологических параметров приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе на основе анализа температурного поля // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 2 (166). С. 78—83.
3. Авдонин Н. А. Математическое описание процессов кристаллизации. — Рига: Зинатне, 1980. — 180 с.
4. Бартенев Г. М. Физика и механика полимеров. — М.: Высш. школа, 1983. — 391 с.
5. Spina R., Spekowius M., Hopmann Ch. Multiphysics simulation of thermoplastic polymer crystallization // Materials & Design. 2016. V. 95. P. 455—469.
6. Rong Y., He H. P., Cao W., Shen C. Y., Chen J. B. Multi-scale molding and numerical simulation of the flow-induced crystallization of polymer // Computational Mat. Sci. 2013. V. 67. P. 35—39.
7. Chebbo Z., Vincent M., Boujlal A., et al. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes // Polymer Engineering And Science. 2015. V. 55. № 1. P. 123—131.
8. Труфанов Н. А., Сметанников О. Ю., Завьялова Т. Г. Численное решение краевых задач механики полимеров с учетом фазовых и релаксационных переходов // Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 7. С. 45—50.
9. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: справ. / под ред. Григорьева И. С., Мейлхова Е. З. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
10. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979. — 392 с.
11. Библиотека FEniCS. <http://fenicsproject.org/>
12. Программа GMSH. <http://geuz.org/gmsh/>
13. Программа ParaView <http://paraview.org/>
14. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.

## CONTROL OF THE HEAT PROCESS OF CONNECTING POLYETHYLENE PIPES BY USING ELECTROFUSION REDUCER COUPLING AT LOW TEMPERATURES

N. P. Starostin, R. S. Tikhonov

Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, Russia

A. S. Shishigina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*Using the methods of information technology, the welding technology is developed using an electrofusion reducer coupling of polyethylene pipes of different diameters for gas pipelines at climatic ambient temperatures below the standard. It is shown by calculations that at low air temperatures, it is possible to provide cooling of the heat-affected zone according to the law for welding to the conditions of permissible air temperatures by preheating with equalization of temperatures and uneven thermal insulation of the outer transition surface.*

**Keywords:** polyethylene pipes, electrofusion reducer coupling, electrofusion welding, mathematical model, finite element method, phase transition, crystallization.

Старостин Николай Павлович, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: nikstar56@mail.ru

Тихонов Роман Семенович, научный сотрудник.

E-mail: roman\_tikhon@mail.ru

Шишигина Агата Семеновна, студентка.

E-mail: agathashishigina1998@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16 марта 2020 г.



УДК 658.5

## МОДЕЛИ СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Р. В. Шубин

Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,  
Санкт-Петербург, Россия

*Рассмотрен процесс разработки и анализа автоматизации средствами информационных технологий (ИТ-процессов) моделей структур, обеспечивающих систему деятельности научно-производственных организаций РФ. Обосновано применение таких моделей для генерации требований к компонентам ИТ-инфраструктуры, реинжиниринга процессов, улучшения деятельности организаций, обеспечивающих жизненный цикл сложной наукоемкой продукции.*

**Ключевые слова:** научно-производственная организация, процессы автоматизации, структура ИТ, IDEF0, синтез сложных систем, функциональное моделирование.

В целях познания системы деятельности, выявления и детализации проблем функционирования и управления научно-производственных организаций (НПО) целесообразно применение функциональных моделей и моделей данных, разработанных в соответствии со стандартами методологии SADT [1]. Такие модели должны разрабатывать высшее руководство НПО, в том числе ИТ-руководство. Они должны быть пригодными для генерации требований к ИТ-процессам и средствам на текущем и целевом уровнях зрелости процессов деятельности [2, 3].

### Исходные положения

НПО РФ часто являются вполне конкурентоспособными на отечественном рынке наукоемкой продукции, однако для соответствия лучшим образцам международного рынка, достижения и поддержания глобальной конкурентоспособности требуется постоянное улучшение (реинжиниринг) системы деятельности. Кроме того, для таких организаций по-прежнему актуальной является проблема непрерывного поддержания конкурентоспособности на отечественном рынке. Объем заказов, сложность изделий и требования к ним возрастают и ужесточаются. Процессы деятельности НПО РФ зачастую недостаточно, фрагментарно автоматизированы и комплексно не охвачены ИТ. Регулярно возникают инциденты в виде ошибок в проектной документации, дублировании операций, потере и устаревании данных, сбоев в эксплуатации продукции. Имеют место уязвимости информационной безопасности, непрозрачный контроль процессов, множество неформализованных процедур. Не развита трассировка целей и требований к процессам и ресурсам, недостаточна коммуникация между подразделениями и рабочими группами. Все это приводит к значительному росту себестоимости продукции, увеличению трудоемкости, сдвигу сроков выполнения заказов, потере репутации организации.

Обобщая изложенное, можно охарактеризовать большую часть НПО РФ как организации,

процессы деятельности которых находятся на низких (начальном, осуществленном, управляемом) уровнях зрелости. Преобладает ситуационное управление и управление проектами, ресурсы выделяют не всегда полностью и своевременно. Организационная структура НПО — вертикальная, часто перестраивается в целях улучшения управления и реакции на вызовы, поскольку не является следствием реинжиниринга процессов. Передача информации на высшие уровни такой структуры затруднена. При этом в системе деятельности НПО РФ, как правило, уже существует ИТ-инфраструктура с уклоном развития в сторону автоматизации процессов конструкторско-технологической подготовки производства. Процессы планирования и контроля слабо охвачены ИТ. Требуется познание структуры процессов управления посредством моделирования системы деятельности НПО. Целесообразен реинжиниринг существующей ИТ-инфраструктуры и моделирование структуры ИТ-функций и данных в целях повышения уровня возможностей ИТ-процессов, автоматизации деятельности и, следовательно, устранения выявленных проблем, поддержания и повышения конкурентоспособности.

Существующая ИТ-инфраструктура НПО РФ зачастую обеспечивает "лоскутный" характер автоматизации деятельности. Процессы обеспечивают пулом разнообразных не связанных между собой специализированных ИТ-средств: систем управления проектами и задачами, базами данных, версиями, конструкторской документацией. Отсутствует единое информационное пространство проектирования, производства и управления. Все это приводит к дублированию данных, использованию избыточных ресурсов, росту трудоемкости и дороговизне обслуживания указанных систем, а также снижает уровень безопасности хранения данных и затрудняет выделение из них управленческой информации.

Моделирование системы деятельности исследуемых НПО отличается следующими проблемами:

- трудоемкость получения и неполнота данных о деятельности НПО. Существующие



фрагменты сценариев деятельности не описывают НПОр как целое. Описанные процедуры и регламенты не выполняют или выполняют частично. Существует большое количество неформализованных и неописанных процедур;

- различная трактовка терминов и определений в регламентирующих документах (стандартах). Стандарты организации разрабатываются в разное время разными специалистами, частично дублируют друг друга, имеют различия в понятийном аппарате и ссылочных документах;

- отсутствие системы метрик (количественной оценки) процессов деятельности. Неформализованность критериев оценки эффективности деятельности и управления деятельностью;

- трудность достижения консенсуса (поддержания выбранной точки зрения модели)

между участниками моделирования в связи с различным пониманием процессов деятельности и управления разными руководителями. В разработке моделей принимает участие большое количество руководителей разного уровня с различным видением системы деятельности "как будет";

- отсутствие необходимых данных для синтеза модели целевого состояния "как будет" и вытекающая из этого необходимость добывать и генерировать новые данные на определенных уровнях декомпозиции.

На основании описаний (IDEF-моделей) текущего и целевого состояний системы деятельности конкретной НПОр (рис. 1, 2) должны быть разработаны IDEF-модели структуры ИТ-процессов, обеспечивающих такую деятельность.

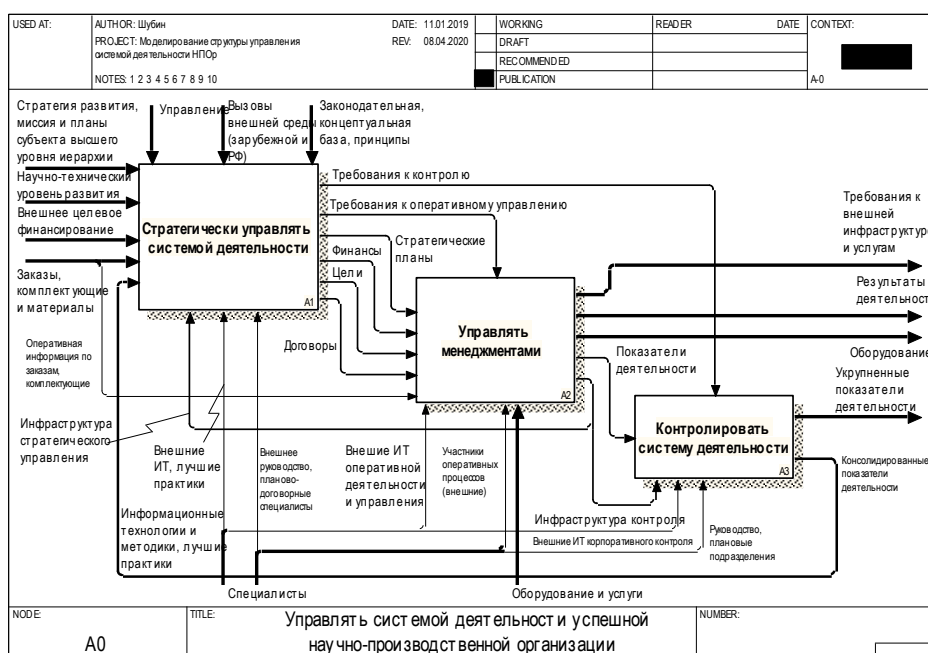


Рис. 1. Декомпозиция контекстной диаграммы функциональной модели системы деятельности НПОр



Рис. 2. Иерархия менеджментов и процессов функциональной модели системы деятельности НПОр

Модель структуры ИТ-процессов определенного (текущего либо целевого, планируемого) состояния системы деятельности генерирует требования к компонентам ИТ-инфраструктуры, проектирование которой осуществляется в соответствии с известным сводом методик и лучших практик [3—5]. Процесс построения структуры ИТ-процессов и генерации требований к ИТ-средствам анализируется и формулируется в виде методики, составляющей совокупность методов и технологий, применимую к классу исследуемых НПОр.

Структуру ИТ-процессов НПОр образуют взаимосвязанные механизмы и функции автоматизации, выявленные по результатам SADT-моделирования системы деятельности. Требования к функциям автоматизации вытекают непосредственно из сути автоматизируемых функций модели деятельности. Структура ИТ-процессов НПОр – сложная многосвязная иерархическая система, которую необходимо определить для текущего и планируемого уровня развития НПОр для ее улучшения и достижения успеха. При этом, так же как и при моделировании системы деятельности, для познания (моделирования) ИТ-структуры целесообразно применять методы и средства методологии SADT, а также принцип подчиненного управления (регулирования).

### Модели структуры ИТ-процессов

Результат моделирования – совокупность моделей ИТ-процессов для разных уровней зрелости (текущего и целевого) НПОр, процессы деятельности которой охватывают весь жизненный цикл (ЖЦ) наукоемкой продукции, участвуют в создании сложных технических систем и нуждаются в улучшении (автоматизации) с целью достижения и поддержания своей конкурентоспособности. Таким образом, модели структуры ИТ-процессов и функций автоматизации

будут охватывать все процессы ЖЦ и будут пригодны в качестве исходной информации для моделирования структуры ИТ организаций исследуемого класса.

Цель моделирования текущего состояния ИТ — построить понятную структуру взаимосвязанных процессов и функций автоматизации средствами ИТ (процессов целеориентированного применения информационных технологий — ИТ-процессов), ресурсов и механизмов, обеспечивающих текущую (существующую) систему деятельности НПОр, пригодную для выявления и генерации требований к классам ИТ-средств — компонентам ИТ-инфраструктуры.

Модель (рис. 3) должна отражать общее и особенное в структуре ИТ-процессов для деятельности НПОр, указывать на общие проблемы автоматизации деятельности организаций такого класса.

Модель должна отвечать на следующие вопросы:

- Какие ИТ-процессы, менеджменты и механизмы (системы) используют в деятельности? Какова их взаимосвязь и иерархия?
- Какие проблемы применения ИТ в деятельности существуют на данный момент?
- Какие требования предъявляют к классам ИТ-средств при текущей структуре ИТ?

Требуемая степень детальности модели: выявление всех ИТ-процессов, механизмов (систем), ресурсов и данных, автоматизирующих деятельность НПОр.

Практическое использование модели: выявление проблем в ИТ-автоматизации деятельности в целях последующего ее улучшения, реинжиниринга ИТ-процессов (синтеза целевой модели ИТ); определение используемых ИТ-средств автоматизации деятельности; генерация требований к ИТ-средствам.

Точка зрения: руководитель ИТ-подразделения.

Границы модели: ИТ-процессы системы деятельности и их связи с внешней средой.



Рис. 3. Контекстная диаграмма функциональной модели "как есть" структуры ИТ-процессов

Задачи, решаемые функцией контекстной диаграммы: планировать, организовывать, контролировать и влиять на организационно-техническую систему ИТ НПО, обеспечивающую ее систему деятельности и достижение целей. Для существующей структуры ИТ-функций выделены ее внешние связи: управления (ограничения и требования) и механизмы, входы и выходы контекстной модели.

Декомпозиция контекстной диаграммы показана на рис. 4.

Задачи блоков диаграммы декомпозиции:

**Функция А1.** Анализировать потребности системы деятельности, требования процессов, а также поступающие массивы внешних по отношению к системе деятельности данных. Планировать создание, масштабирование, изменение, развертывание на рабочих местах, вывод из эксплуатации ИТ-средств. Разрабатывать план развития ИТ, имеющий регламент обеспечения непрерывной работы сервисов и предоставления услуг, а также перечень мероприятий по адаптации и внедрению нового программного и аппаратного обеспечения, описание пилотных проектов.

Конкретизировать и формулировать требования к ИТ-средствам процессов деятельности:

- коммутационному оборудованию и сетям передачи данных;
- серверным платформам и операционным системам;
- параметрам аппаратного обеспечения рабочих мест специалистов;

- корпоративным информационным системам (документооборот, корпоративная электронная почта, ServiceDesk, ERP и т. д.);

- организации доступа к интернет-порталам, в том числе к порталам конкурсных процедур и госзакупок; взаимодействию с другими организациями;

- ПО САПР (CAD\CAE\CAM);

- ПО коллективной разработки (PDM-системе), хранения и управления электронными данными;

- средствам защиты информации.

**Функция А2.** Преобразовывать программные и аппаратные средства, знания, практики и компетенции в ИТ-сервисы и ИТ-услуги, необходимые для деятельности в соответствии с ИТ-планом и системой требований к ИТ. Деятельность по автоматизации процессов должна соответствовать нормативам, актуальным концепциям и законодательной базе. Создавать (адаптировать, конфигурировать, интегрировать приобретенные) следующие компоненты ИТ-инфраструктуры:

- рабочие станции специалистов (офисные и конструкторские ПК, графические станции, тонкие клиенты), оргтехнику (МФУ, плоттеры, широкоформатные сканеры, ламинаторы, копиры после настройки и запуска в работу), общесистемное ПО (операционные системы Windows и Linux), антивирусную систему, архиваторы, просмотрщики) и офисное ПО (текстовые редакторы, редакторы таблиц и презентаций, pdf-редакторы);

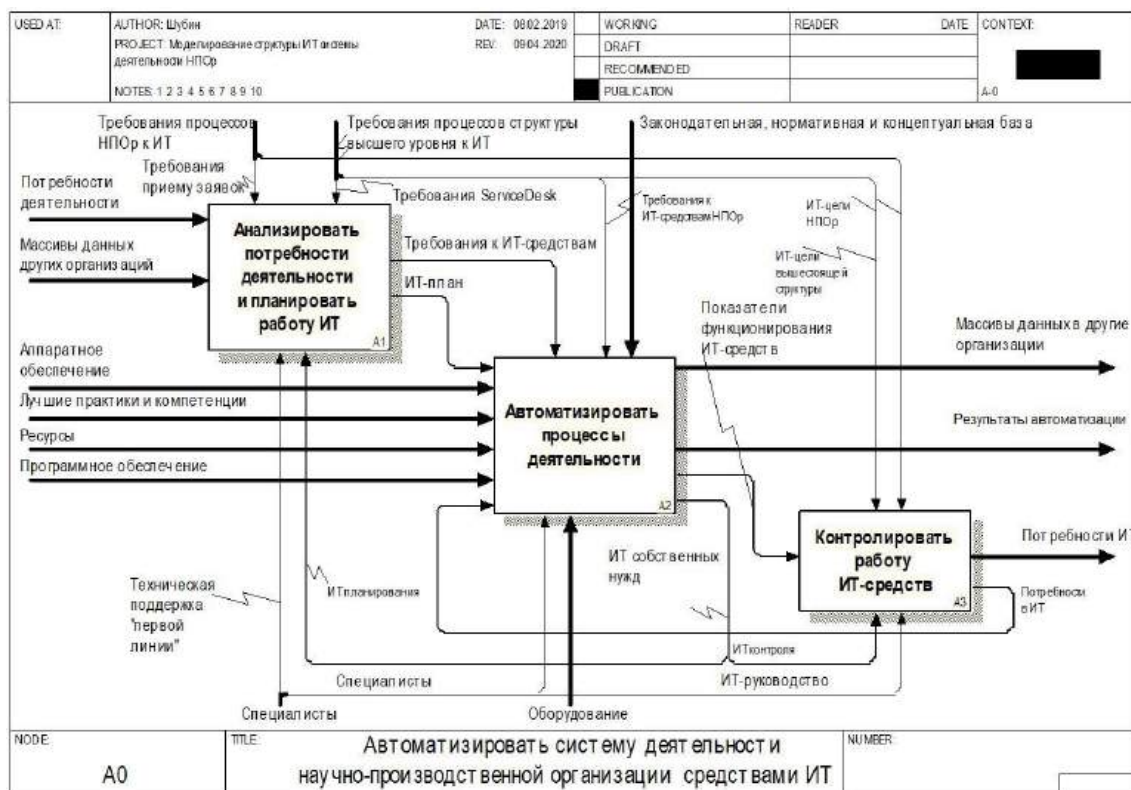


Рис. 4. Декомпозиция A0 функциональной модели "как есть" структуры ИТ-процессов

- сети передачи данных;
- службу каталогов имен пользователей и ПК;
- доступ к сети Интернет;
- серверные платформы и СУБД;
- доступ к торговым интернет-площадкам, государственным порталам закупок;
- справочно-информационные системы;
- ИТ корпоративного управления (ERP, документооборот, корпоративная электронная почта);
- ПО конструкторской САПР (после адаптации);
- ПО электротехнической САПР (после адаптации);
- ПО САПР общего назначения (после адаптации);
- системы инженерного анализа: "легкая" и "тяжелая" (после адаптации);
- систему математического моделирования;
- ПО САПР проектирования печатных плат и ПЛИС (после адаптации);
- САМ-систему;
- интегрированные среды разработки и тестирования программных кодов (IDE);
- PDM/PLM-систему управления инженерными данными и ЖЦ (после адаптации).

Генерировать результаты (показатели) автоматизации.

*Функция А3.* На основании текущих показателей функционирования используемых ИТ-средств отслеживать:

- количество и содержание замечаний по взаимодействию с другими организациями (отраслями и организациями-регуляторами) в части передачи данных;
- наличие доступа к используемым и внедряемым корпоративным ИТ-сервисам структуры высшего уровня;
- количество и содержание замечаний по автоматизированной разработке документов НИОКР (конструкторских и технологических) в распространенных форматах данных и в соответствии с актуальными нормативами;
- объем и производительность хранилища электронных версий документов НИОКР;
- количество и содержание замечаний и предложений по автоматизированному инженерному анализу;
- количество и содержание замечаний по автоматизированному математическому моделированию;
- количество и содержание замечаний по календарному планированию НИОКР;
- процент времени простоя ИТ-средств;
- количество и содержание инцидентов информационной безопасности;
- текущее число пользователей ИТ-сервисов и услуг;
- номенклатуру используемого программного и аппаратного обеспечения;

• соответствие ПК сотрудников системным требованиям используемого ПО;

- используемые финансовые средства по категориям расходов (закупка, продление, поддержка, обслуживание, расходные материалы и т. д.).

Генерировать потребности ИТ-менеджмента, а также инициировать корректирующие действия по адаптации ИТ-сервисов и услуг в ответ на корректировку требований процессов.

Диаграмма А0 укрупненно описывает текущую структуру обеспечения системы деятельности ИТ-средствами и автоматизации ее процессов. Она определяет общие требования к ИТ, показатели их функционирования и текущие результаты автоматизации.

Особенности текущего функционирования менеджментов отражают следующие автоматизированные задачи:

- создание базовых ИТ
  - управление заявками (Service Desk),
  - документооборот и делопроизводство,
  - обмен информацией с внешней средой,
  - защита информации;
- финансово-экономическая деятельность
  - договорная работа,
  - бухгалтерия,
  - анализ данных и отчетность,
  - финансирование работ,
  - учет персонала;
- управление и выполнение НИОКР
  - управление данными разработки,
  - создание результатов (электронных документов, моделей, расчетов, результатов интеллектуальной деятельности, знаний и технологий);
- техническое обслуживание и ремонт
  - анализировать качество продукции,
  - осуществлять работу по претензиям и рекламациям.

По итогам разработки и анализа текущей модели процессов автоматизации можно сделать вывод о том, что разработанная структура ИТ-процессов примера НПОр является типичной для отечественных НПОр [6, 7] низких (осуществляемого, управляемого) уровней зрелости процессов и характеризуется большой номенклатурой слабо связанных между собой ИТ-средств, неполным использованием их функциональных возможностей и недостаточным масштабированием, ситуационным ИТ-планированием, отсутствием ИТ-целей и четкой связи ИТ с целями организации, неразвитостью ИТ-менеджмента, слабой автоматизацией процессов управления и контроля деятельностью. В связи с этим количество инцидентов и степень неудовлетворенности ИТ велики и оказывают значительное влияние на эффективность процессов деятельности. Дополнительными проблемами могут быть: высокий износ, низкие надежность и производительность используемых

серверных платформ, сетей передачи данных и коммутационного оборудования, отсутствие механизмов резервного копирования данных; отсутствие единых стандартов оформления документов в электронной форме и единых настроек специализированного ПО; фрагментарное использование PDM-системы и отсутствие вследствие этого единого информационного пространства коллективной разработки.

При переходе на более высокие уровни зрелости процессов необходимо обеспечить средствами ИТ и автоматизировать вновь организованные менеджменты и процессы, а также существующие процессы после их реинжиниринга. ИТ-инфраструктура должна быть целеориентированной, удовлетворять требованиям достигаемых уровней зрелости.

Для апробации ранее сформулированного метода представления сложных систем деятельности НПО, используя разработанную в целях определения требований к архитектуре ИТ функциональную модель системы деятельности примера НПО целевого уровня зрелости ("как будет"), необходимо синтезировать модели структуры ИТ-процессов и ИТ-средств, обеспечивающих перспективную успешную деятельность НПО. Модель должна быть связана с соответствующей моделью деятельности, выполнена в нормах методологии SADT, использовать принцип подчиненного управления и определять необходимые ИТ-средства и требования к ним.

Цель разработки модели "как будет" — построить понятную структуру взаимосвязанных ИТ-процессов, ресурсов и механизмов, автоматизирующих перспективную (при переходе с текущего (управляемого) на планируемый (определяемый, стандартизируемый) уровень зрелости процессов) систему деятельности

НПО, пригодную для выявления и генерации требований к компонентам проектируемой ИТ-инфраструктуры — ИТ-подсистемы, информационно обеспечивающей систему деятельности при переходе на целевой уровень зрелости процессов.

Модель должна ответить на следующие вопросы:

- Какие ИТ-процессы, менеджменты и механизмы необходимо использовать и внедрять при переходе на целевой уровень зрелости? Какими должны быть их взаимосвязь и иерархия?

- Какие проблемы применения ИТ в деятельности после реинжиниринга могут быть выявлены по результатам моделирования?

- Какие требования предъявляют к классам ИТ-средств перспективной структуры ИТ?

Точка зрения руководителя ИТ-подразделения.

Требуемая степень детальности модели — выявление всех ИТ-процессов, автоматизирующих деятельность, механизмов и данных.

Модель должна использоваться при выявлении проблем в ИТ-автоматизации деятельности при ее улучшении, реинжиниринге ИТ-процессов (синтезе модели ИТ "как будет"), определении перспективных ИТ-средств автоматизации деятельности, генерации требований к таким ИТ-средствам.

Границы модели: ИТ-процессы системы деятельности НПО и их связи с внешней средой.

Отличие в содержании связей диаграммы А-0 модели "как будет" (рис. 5) от модели "как есть" заключается в наличии в системе деятельности документированной стратегии развития ИТ (планов развития ИТ), содержащей связанные с целями организации ИТ-цели и их обоснование, видение высшим руководством места ИТ в деятельности.

Рис. 5. Контекстная диаграмма А-0 функциональной модели "как будет" структуры ИТ-процессов





На основании ИТ-стратегии формулируют задачи, разрабатывают планы автоматизации менеджментов и процессов. Результаты автоматизации сравнивают с целевыми показателями ИТ-планов в целях организации корректирующих мероприятий и соответствия структуры ИТ утвержденной ИТ-стратегии.

Задачи, решаемые в контекстной диаграмме: планировать, организовывать, контролировать, оптимизировать, оценивать риски и влиять на организационно-техническую систему ИТ, обеспечивающую систему деятельности и достижение целей на достигаемых уровнях зрелости процессов; анализировать входные данные, автоматизировать процессы менеджментов в соответствии с разработанными планами и целями ИТ; генерировать результаты (показатели) автоматизации; обеспечивать взаимодействие с системой деятельности сторонних организаций путем двустороннего обмена транспортными массивами данных.

Декомпозиция контекстной диаграммы показана на рис. 6.

В отличие от модели текущей структуры ИТ-процессов в модели "как будет" процессы автоматизации являются целеориентированными, подчиненными ИТ-стратегии организации. Доминирующей функцией является планирование работы ИТ. На основании контроля показателей

работы ИТ генерируют отчеты и проекты предложений для последующего анализа и учета при планировании (обратная связь функционирования ИТ-системы). Введены процессы автоматизации новых менеджментов модели деятельности "как будет".

**Функция А1.** На основании внешних по отношению к структуре ИТ лучших практик и компетенций ИТ-стратегии и целей организации, потребностей процессов деятельности, требований вышестоящей структуры, нормативно-концептуальной базы разрабатывать и корректировать ИТ-цели, укрупненный план достижения ИТ-целей (ИТ-план), а также планы автоматизации менеджментов, процессов и отдельных мероприятий, внедрения новых, развития используемых и вывода из эксплуатации неактуальных ИТ-сервисов, предоставления ИТ-услуг, защиты информации, подготовки кадров в области ИТ. Анализировать и перерабатывать требования к ИТ-средствам и ИТ-процессам, структурированные данные о работе ИТ, отчеты и проекты предложений. Анализировать рынок ИТ-средств, концепций и технологий. Обмениваться опытом с аналогичными НПО. Организовывать и обосновывать структуру и выполняемые функции ИТ-службы НПО.

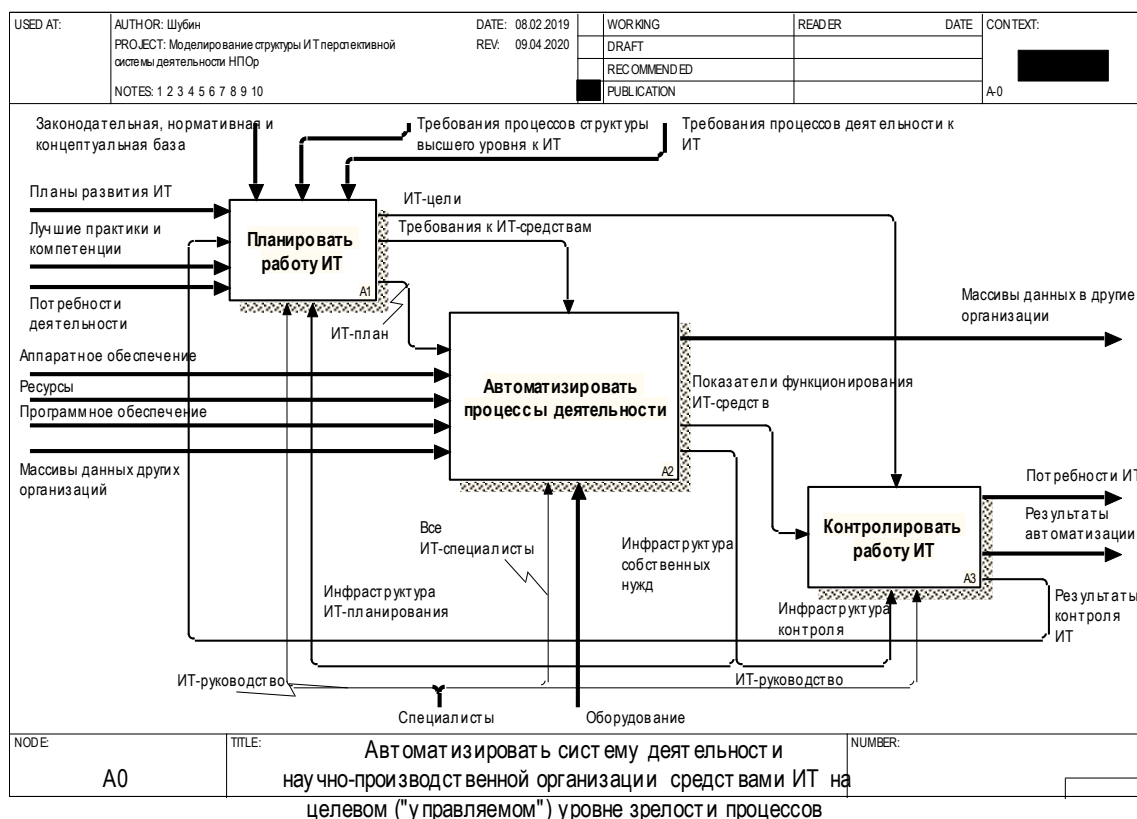


Рис. 6. Декомпозиция контекстной диаграммы функциональной модели "как будет" структуры ИТ-процессов



*Функция А2.* Обеспечивать процессы деятельности и менеджменты, достигать цели организации путем комплексной ИТ-автоматизации. Реализовывать мероприятия, заложенные в ИТ-планах.

*Функция А3.* Консолидировать текущие показатели работы ИТ, генерировать отчеты и предложения к ИТ-планированию, определять достижение ИТ-целей.

Функции автоматизации должны выполнять следующие автоматизированные задачи:

- планирование работы ИТ
  - сбор внешних и внутренних требований к ИТ, планов структуры высшего уровня и потребностей деятельности, лучших практик, результатов функционирования ИТ;
  - хранение, структуризация, изменение и представление собранных данных;
  - анализ требований, планов и результатов функционирования ИТ;
  - разработка и корректировка ИТ-планов, целей и требований к процессам автоматизации на основании проанализированных данных;
  - передача данных процессам автоматизации менеджментов;
- создание базовых ИТ
  - управление заявками (Service Desk) и консультации;
  - документооборот и делопроизводство;
  - обмен информацией с внешней средой;
  - защита информации;
  - администрирование хранения данных;
- стратегическое планирование
  - получение данных и информации структуры высшего уровня и других организаций, план работы ИТ в части её касающейся, а также осуществление сбора требований к автоматизации стратегического планирования;
  - хранение, сравнение и анализ полученных данных, принятие, представление и транслирование стратегических управленческих решений в подчиненные менеджменты;
  - обеспечение разработки стратегических планов НПОр по результатам анализа данных;
- финансово-экономическая деятельность
  - договорная работа;
  - бухгалтерия;
  - анализ данных и отчетность;
  - финансирование проектов;
  - учет персонала;
- управление качеством
  - мониторинг, сбор и хранение показателей качества продукции и процессов;

- анализ показателей качества, разработка целей в области качества;
- управление портфелем проектов
  - управление данными разработки;
  - создание результатов (электронных документов, моделей, расчетов, результатов интеллектуальной деятельности, знаний и технологий);
  - управление ЖЦ изделий;
  - сбор и анализ показателей выполнения отдельных проектов и портфеля проектов в целом;
  - календарное планирование, выдача и контроль заданий;
  - принятие управленческих решений на основе анализа проектных данных;
- управление инфраструктурой
  - мониторинг состояния объектов опытно-экспериментальной базы, производственных фондов, зданий и сооружений, коммуникаций;
  - плановое и внеплановое обслуживание объектов инфраструктуры, учет расходовемых ресурсов;
- логистическая поддержка
  - работа по претензиям и рекламациям;
  - входной и выходной контроль комплектующих и изделий;
- контроль деятельности
  - обеспечивать сбор и хранение характеристик менеджментов и процессов;
  - преобразовывать характеристики в показатели для последующего вычисления критериев достижения целей организации.

ИТ-средства, необходимые для решения автоматизированных задач целевого уровня зрелости:

- базовые (рабочие станции и серверные платформы, операционные системы и СУБД, офисное ПО, средства защиты информации);
- автоматизации разработки (включая интегрированные механизмы ПО САПР и PDM/PLM);
- база знаний, типовых решений и технологий;
- управления нормативно-справочной информацией и научно-технической библиотекой;
- управления технологической подготовкой производства, производством, производственными и испытательными фондами;
- учета и планирования ресурсов (ERP);
- управления портфелем проектов, проектами и задачами;
- управления качеством и ЖЦ изделий;
- делопроизводства и электронного документооборота.

### Выводы

Модель структуры ИТ-процессов автоматизации деятельности целевого уровня зрелости НПОр отражает автоматизацию вновь организованных процессов и менеджментов, а также реинжиниринг существующих. Целевой уровень зрелости – следующий уровень, на который требуется перейти НПОр для улучшения своей системы деятельности.

Требования к ИТ на целевом уровне зрелости:

- возможность взаимодействия с другими организациями в части максимально бесшовной передачи структурированных данных. Оперативная генерация отчетов по формам и запросам контролирующих структур;
- высокоскоростной доступ к корпоративным ИТ-сервисам вышестоящей структуры;
- автоматизированная разработка проектных документов (конструкторских и технологических) в распространенных форматах данных и в соответствии с актуальными нормативами в едином информационном пространстве;
- соответствие единого информационного пространства принципам коллективной разработки и параллельного инжиниринга;
- проектирование на основе моделей; внедрение в проектную деятельность НПОр электронных конструкторских документов в соответствии с нормами ЕСКД;
- интеграция процесса автоматизации проектирования и производства в части оперативного обмена проектными данными для осуществления технологической подготовки производства и изготовления изделий;
- ведение базы данных ЖЦ выпускаемой продукции с информацией о качестве, обслуживании и ремонте;
- хранение (архивирование) и управление проектными документами в электронной форме;
- автоматизированный прочностной, электромагнитный, гидрогазодинамический, тепловой и системный инженерный анализ;
- автоматизированное математическое моделирование;
- управление проектом и портфелем проектов;
- бесперебойная работа в течение рабочего дня;
- защита коммерческой тайны;
- ориентировочное и максимальное число пользователей;
- соответствие ПК сотрудников системным требованиям используемого ПО;

- соблюдение требований государственного и отраслевого регулирования, защиты информации, импортозамещения, реестра отечественного ПО;

- финансовые ограничения (бюджет);
- соблюдение требований стандартов и регламентов вышестоящей структуры.

Внешние требования к ИТ в модели "как будет" декомпозируют для функций автоматизации, определяют обеспечивающие их классы ИТ-средств. Таким образом, деятельность на целевых уровнях зрелости обеспечивается целеориентированной структурой ИТ, определяющей требования к компонентам ИТ-инфраструктуры, организация и управление которыми осуществляется известными лучшими практиками.

На более высоком уровне зрелости для дальнейшего улучшения управления системой деятельности целесообразно образование доминирующего менеджмента знаний, осуществляющего сбор, обработку, хранение, анализ и предоставление актуальных методик, технологий, технических решений менеджментам для последующего использования. Образование менеджмента знаний позволит минимизировать временные риски, риски потери качества и потребует специализированного ИТ-механизма (системы управления знаниями), интегрированного с ИТ подчиненных менеджментов.

В целях определения структуры ИТ-процессов на более высоких уровнях зрелости целесообразна разработка отдельных IDEF-моделей деятельности и ИТ. Новые модели будут использовать модели предыдущих уровней с добавлением вновь образованных и преобразованных менеджментов и процессов.

### Литература

1. Прокофьев Г. И., Шубин Р. В. Проектирование ИТ-инфраструктуры системы управления научно-производственного предприятия // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 3. С. 47–55.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504-2012 Информационная технология. Оценка процесса.
3. COBIT 5: Бизнес-модель по руководству и управлению ИТ на предприятии. — ICASA, 2012. — 94 с.
4. CALS NATO Handbook [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nato.int/docu/handbook/2006/hben2006.pdf>
5. Словарь терминов и определений ITIL на русском языке. ITIL® V3 Glossary, v0.92, 30 April 2009.
6. Киселев В. Д., Рязанцев О. Н., Данилкин Ф. А., Губинский А. М. Информационные технологии в оборонно-промышленных комплексах России и стран НАТО. — М.: Знание, 2017. — 256 с.
7. [http://www.connect-wit.ru/wp-content/uploads/2019/12/001\\_212\\_SD\\_ITOPK\\_2019\\_Sm-1.pdf](http://www.connect-wit.ru/wp-content/uploads/2019/12/001_212_SD_ITOPK_2019_Sm-1.pdf)

---

## MODELS OF THE STRUCTURE OF AUTOMATION PROCESSES THE ACTIVITIES OF RESEARCH AND PRODUCTION ORGANIZATIONS

R. V. Shubin

The Ship Electric Engineering & Technology Institute Krylov State Research Centre,  
St. Petersburg, Russia

*The process of development and analysis of models of structures of automation processes by means of information technologies (it processes) that provide the system of activity of scientific and production organizations of the Russian Federation is considered. The use of such models for generating requirements for it infrastructure components, reengineering processes, and improving the performance of organizations that provide the life cycle of complex science-intensive products is justified.*

*Keywords:* research and production organization, automation processes, IT structure, IDEF0, synthesis of complex systems, functional modeling.

---

Шубин Роман Валерьевич, ведущий инженер-руководитель группы.  
E-mail: rvshubin@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 25 апреля 2020 г.*

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

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

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

**Наши реквизиты:**

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

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

ИНН/КПП \_\_\_\_\_

ОКПО \_\_\_\_\_

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

к/с \_\_\_\_\_ БИК \_\_\_\_\_

Юридический адрес: \_\_\_\_\_

Почтовый адрес: \_\_\_\_\_

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

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

**Справочно:**

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

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

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

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

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».