

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 24  
2018  
№ 4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ  
Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Юрченко А. В. О сервисном подходе к формированию и оценке востребованности киберинфраструктуры науки . . . . . 219

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Сметанин Ю. Г., Ульянов М. В., Пестова А. С. О числе возможных реконструкций слов по подсловам при окне переменного сдвига . . . . . 233

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

Курейчик В. В., Жиленков М. А., Курейчик Вл. Вл. Генетический алгоритм решения задачи компоновки с учетом электромагнитной совместимости . . . 239

Кобзаренко Д. Н. Технологии геоинформационного моделирования пространственного распределения геотермальных ресурсов . . . . . 244

Дубанов А. А. Задача преследования. Решение в системе вычислительной математики MathCAD . . . . . 251

### СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Хабаров В. В., Шуталева Н. С., Костин В. И. Информационная система проектирования предприятий . . . . . 256

### ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Васильев В. И., Вульфин А. М., Гузаиров М. Б. Оценка рисков информационной безопасности с использованием нечетких продукционных когнитивных карт . . . . . 266

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Родионов А. Н. Метод и алгоритм структурного анализа достижимости узлов в сетях потоков работ . . . . . 274

#### Главный редактор:

СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.

#### Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

#### Редакционный совет:

БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.  
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,  
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.  
КУЛЕШОВ А. П.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
ПОПКОВ Ю. С.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
РУСАКОВ С. Г.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
РЯБОВ Г. Г.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
СОЙФЕР В. А.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
СОКОЛОВ И. А.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.  
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
ШАХНОВ В. А.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
ШОКИН Ю. И.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
ЮСУПОВ Р. М.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

#### Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.  
АНТОНОВ Б. И.  
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.  
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.  
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.  
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.  
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.  
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.  
ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш., к. т. н., доц.  
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.  
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.  
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.  
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.  
КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.  
ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.  
МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.  
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.  
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.  
ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.  
САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.  
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.  
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.  
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)  
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.  
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

#### Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.  
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.  
ЛЫСЕНКО А. В.  
ЧУГУНОВА А. В.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.  
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.  
Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

# INFORMATION TECHNOLOGIES

## INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 24  
2018  
No. 4

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

DOI 10.17587/issn.1684-6400

ISSN 1684-6400

### CONTENTS

#### GENERAL QUESTIONS

**Yurchenko A. V.** On the Approach Considering Scientific IT-Service as a Base unit for Cyberinfrastructure of Science ..... 219

#### INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

**Smetanin Yu. G., Uljanov M. V., Pestova A. S.** On the Number of Possible Reconstructions of Words Using Subwords with Windows of Different Shift ..... 233

#### MODELING AND OPTIMIZATION

**Kureichik V. V., Zhilenkov M. A., Kureichik VI. VI. Jr.** Genetic Algorithm or Partitioning Problem in View of Electromagnetic Compability ..... 239

**Kobzareno D. N.** Technologies for Geoinformation Modeling of Spatial Distribution of Geothermal Resources ..... 244

**Dubanov A. A.** The Pursuit Problem. The Decision on the System of Computational Mathematics MathCAD ..... 251

#### CAD-SYSTEMS

**Habarov V. V., Shutaleva N. S., Kostin V. I.** Information System for Design Enterprises ..... 256

#### INFORMATION SECURITY

**Vasilyev V. I., Vulfin A. M., Guzairov M. B.** Evaluation of Information Security Risks with Use of Rule-Based Fuzzy Cognitive Maps ..... 266

#### INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ORGANIZATIONAL AND SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

**Rodionov A. N.** Reachability of Workflow Nodes: The Method of Structural Analysis and Algorithm ..... 274

#### Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Kuleshov A. P., Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Popkov Yu. S., Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Soifer V. A., Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Sokolov I. A., Member of RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Suetin N. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Chaplygin Yu. A., Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Shokin Yu. I., Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS, Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.  
Antonov B. I.  
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Zagidullin R. Sh., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.  
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)  
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Martyinov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.  
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)  
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)  
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

#### Editors:

Bezmenova M. Yu.  
Grigorin-Ryabova E. V.  
Lysenko A. V.  
Chugunova A. V.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ GENERAL QUESTIONS

УДК 004.67, 004.75

DOI: 10.17587/it.24.219-232

**А. В. Юрченко**, канд. физ.-мат. наук, первый зам. директора, e-mail: yurchenko@ict.nsc.ru, Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИВТ СО РАН), г. Новосибирск

## О сервисном подходе к формированию и оценке востребованности киберинфраструктуры науки

*Рассматриваются некоторые проблемы поддержки и развития информационно-вычислительной и телекоммуникационной инфраструктуры научных исследований как системы научных ИТ-сервисов. Определен ряд основных понятий научной киберинфраструктуры, научного ИТ-сервиса и их составляющих, устанавливаются взаимосвязи между ними, рассматриваются особенности классификации научных ИТ-сервисов и вопросы оценки их стоимости с примерами сервисов ключевых академических ИТ-провайдеров, обеспечивающих ИТ-ресурсами подведомственные ФАНО России научные учреждения на Дальнем Востоке, в Сибири и в г. Москва. Результаты работы могут быть использованы как для постановки и решения стратегических задач развития киберинфраструктуры российской науки, так и для уточнения технологий оценки востребованности и целесообразности поддержки отдельных компонентов такой инфраструктуры.*

**Ключевые слова:** киберинфраструктура науки, научный ИТ-сервис, наукоёмкость и ресурсоёмкость ИТ-сервиса, востребованность и полезность научного ИТ-сервиса, классификация научных ИТ-сервисов

### Введение

Технологии преобразуют мир, и наука не остается в стороне от этого преобразования. Являясь породителем новых технологий, сфера исследований и разработок является и главным их потребителем. Это верно и в отношении информационных технологий (ИТ). Новые возможности по сбору, хранению, обработке и анализу данных, обмену и распространению информации отразились, в первую очередь, на научном сообществе. Теперь, когда можно обмениваться любыми результатами исследований практически мгновенно и в любых количествах, остро стоят вопросы упорядочивания огромных массивов научных данных, обеспечения их целостности, сохранности и доступности, а самое важное — их максимально эффективного совместного использования для решения новых научных и практических задач. Актуальность этих вопросов только возросла в последнее время, когда практически вся измерительная техника, используемая для научных исследований, перешла в цифровой формат и генерирует большие объемы данных.

Передача, хранение и обработка данных — не бесплатный процесс. Его обеспечение требует высоких капиталовложений, аппаратных, про-

граммных и человеческих ресурсов. С одной стороны, это рутинная работа, в совершенстве освоенная современными провайдерами ИТ-услуг, такими как Microsoft, Amazon, Google и др. С другой стороны, научное сообщество предъявляет особые требования к такого рода услугам и не всегда готово оплачивать их, предпочитая покупать оборудование, генерирующее данные, и нередко просто забывая о проблемах, связанных с хранением этих данных и обеспечением доступа к ним и к полученным на их основе результатам.

Крупные игроки рынка облачных услуг, например Microsoft, осознавая, что научное сообщество, с одной стороны, не обладает большими финансовыми возможностями, с другой стороны, имеет достаточно умеренные, в сравнении с бизнес-клиентами, потребности в ИТ-ресурсах, при этом может обеспечить прорыв в решении имеющихся у самих компаний проблем научного и технологического характера, запускают программы, в рамках которых облачные ресурсы для исследований и разработок выделяются бесплатно на конкурсной основе [1]. В Российской Федерации такого пока не наблюдается, в первую очередь потому, что не сформировались игроки рынка облачных услуг, сопоставимые по масштабам с Microsoft, Google и Amazon. Но кро-

ме того, в то время как те же Microsoft, Google и Amazon сами разрабатывают технологии и являются крупнейшими заказчиками и потребителями научных разработок в области ИТ, российские игроки чаще всего являются пользователями готовых ИТ-продуктов в виде аппаратных и программных платформ, разработанных за рубежом, а когда занимаются самостоятельными разработками, то опираются преимущественно либо на зарубежные исследования, либо на исследования времен СССР.

Отсутствие внутри Российской Федерации поставщиков облачных услуг, готовых бесплатно (или условно бесплатно) отдать часть своих ресурсов для научного сообщества, заставляет российских ученых самостоятельно решать вопросы по обеспечению своих потребностей в передаче, хранении, обработке данных, распространении информации и ее оперативном обсуждении. В некотором плане большая часть этих потребностей может быть покрыта возможностями, предоставляемыми международными корпорациями. Так, программа по предоставлению ресурсов Microsoft Azure для научно-исследовательских групп [1] является открытой, и российские ученые также могут стать ее участниками, а облачные сервисы Google давно стали площадкой для обмена информацией и совместной работы с документами для многих российских ученых. Однако вопросы национальной безопасности и сохранения информационной независимости заставляют искать внутренние решения.

## **1. Проблема формирования киберинфраструктуры науки**

Хотя термин "киберинфраструктура" является далеко не новым (его происхождение связывают с пресс-конференцией Ричарда Кларка в 1998 г. [2]) и звучит несколько архаично, предлагается использовать его в сочетаниях "киберинфраструктура науки" и "научная киберинфраструктура" для обозначения комплекса инфраструктурных решений в области ИТ, обеспечивающих научное сообщество информационно-вычислительными и телекоммуникационными ресурсами, необходимыми для проведения исследований, сохранения, опубликования и обсуждения их результатов в цифровом виде. Интенсивное развитие такой инфраструктуры в США и Европе приходится на 2000-е годы [3, 4].

Задача построения киберинфраструктуры российской науки все еще не решена в достаточной степени, хотя соответствующая проблематика активно обсуждалась начиная со второй половины 2000-х годов, правда, ассоциируясь больше с суперкомпьютерными вычислениями [5, 6]. Попытки построить комплексную киберинфраструктуру

науки в России не могли увенчаться успехом в том числе потому, что задача является слишком масштабной и не имеет каких-то единых подходов к своему решению. Тем не менее, отдельные элементы такой инфраструктуры создаются, и вопрос создания общей киберинфраструктуры возможно перевести в плоскость интеграции существующих элементов, а ее развитие рассматривать как эволюцию этих элементов и инструментов совместного управления их использованием. В обозначенном виде проблема формирования целостной киберинфраструктуры научных исследований сводится к идейному оформлению единства тех разрозненных ее элементов, которые уже созданы, к созданию системы учета самих ИТ-ресурсов и их утилизации, оценке потребности в ИТ-ресурсах и своевременной модернизации элементов этой инфраструктуры.

Для того чтобы сделать еще один шаг в этом направлении, предлагается на примере трех крупных поставщиков ИТ-услуг научным организациям, подведомственным ФАНО России: Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН, Института вычислительных технологий СО РАН, Вычислительного центра ДВО РАН, рассмотреть принципы организации доступа других учреждений к поддерживаемым этими организациями информационным, вычислительным и телекоммуникационным ресурсам с примерами таких ресурсов, оценить вклад этих ресурсов и различных сервисов на их основе в решение научных проблем. Также необходимо, опираясь на накопленный опыт предоставления ИТ-услуг, сформулировать ключевые понятия, которыми можно в дальнейшем оперировать при описании тех или иных решений, систематизировать ИТ-услуги и построить расширяемое описание иерархии научных ИТ-сервисов.

## **2. Научные ИТ-сервисы: некоторые определения**

В первую очередь, необходимо отделить киберинфраструктуру науки от традиционных ИТ-услуг, компьютерной техники и телекоммуникационного оборудования общего назначения. Для этого потребуется определить понятие "научного ИТ-сервиса" как особого вида "услуги", которая, с одной стороны, опирается на стандартные программные и аппаратные компоненты, свойственные ИТ-инфраструктуре общего пользования, с другой стороны, обладает спецификой, которая не реализуется в бизнес-ориентированной ИТ-среде, но в которой остро нуждается научное сообщество для успешного решения своих научно-исследовательских задач.

Под *научным ИТ-сервисом* предлагается понимать реализованную в программном и аппарат-

ном виде технологию работы с научными данными. Отметим, что программный и аппаратный инструмент становится ИТ-сервисом, когда пользователи получают доступ к нему через специальные протоколы, либо API, либо приложения, в том числе веб-приложения. К научным данным отнесем результаты научных наблюдений, измерений и вычислений, в том числе преобразований и иных видов обработки данных, представленные в цифровой форме. Технология работы с научными данными — это последовательность (цепочка) действий с ними, приводящая к некоторому заданному результату, имеющему научную ценность. Основные действия с научными данными — это генерация, обработка и анализ, дополнительные — систематизация и представление (в том числе визуализация). Вспомогательные действия: базовые — передача, хранение и вычисления, высокоуровневые — сбор, обмен и публикация (распространение), поиск. Пример типичной цепочки работы с научными данными: генерация — сбор и предварительная обработка — систематизация и хранение — преобразование (обработка) и анализ — публикация.

Генерацией научных данных назовем процесс, в результате которого появляются новые данные, имеющие научную ценность. Примеры генерации научных данных — это научные измерения, например, в результате дистанционного зондирования Земли из космоса, мониторинга сейсмособытий и событий в морях и океанах, секвенирования геномов, компьютерной томографии, энцефало- и кардиографии в исследовательских целях, испытания материалов и конструкций, их спектрографии, проведения опытов на ускорителях частиц, наблюдения за дальним и ближним космосом и многого другого. Не менее важными примерами процессов генерации научных данных являются компьютерное моделирование и преобразование в результате обработки и анализа других данных. Пример генерации научных данных, о котором нельзя забывать, — это написание научных трудов, в том числе отчетов, статей и тезисов, монографий и т.п.

Обработка и анализ научных данных — процесс преобразования одних научных данных в другие научные данные, информацию и знания. Типичные примеры методов и механизмов обработки и анализа научных данных — фильтрация, кластеризация, классификация, статистический или интеллектуальный анализ и др. Систематизация — процесс поиска и установления порядка в наборах данных, построения системы связей между ними, например, в форме цифровых каталогов и электронных библиотек. Представление — процесс преобразования данных в визуальные объекты, от таблиц до диаграмм, графиков и иных изображений.

Передача и хранение научных данных мало отличаются от таковых для бизнеса и иных видов

цифровых данных, а вычисления — это нижний уровень обеспечения компьютерной обработки данных и моделирования. Эти действия опираются на базовые возможности аппаратной инфраструктуры центров обработки данных, вычислительных центров и телекоммуникационной среды и, в свою очередь, являются базовыми для выполнения остальных действий с данными. Сбор данных — автоматизированный или автоматический процесс агрегации данных из заданных источников, чаще всего — измерительных приборов, с частичной или полной их систематизацией перед дальнейшим хранением. Обмен и публикация — действия по организации доступа к научным данным и информации о них для исследователей и других заинтересованных лиц, отличных от получившего (сгенерировавшего, собравшего) их исследователя — владельца данных.

### **3. Научные ИТ-сервисы: примеры и варианты классификации**

Рассмотрим примеры научных ИТ-сервисов, предоставляемых несколькими ключевыми центрами ИТ-обеспечения подведомственных ФАНО России научных организаций, определим их состав и место в соответствии с введенными определениями и сопоставим установленное место с введенной и используемой ФАНО России классификацией.

Научные ИТ-сервисы, заявленные организациями, осуществляющими поддержку общей (коллективного пользования) ИТ-инфраструктуры научных учреждений ФАНО России в регионах и в центральной части, разнесены по следующим категориям (по материалам заседания рабочей группы Комиссии по информатизации ФАНО России по оценке заявок на поддержку ИТКИ для обеспечения функционирования и развития научных информационных сервисов, Москва, 28 апреля 2017).

1. Автоматизированные комплексы для биологии и медицины.
2. Вспомогательная узкоспециализированная информационная система.
3. Информационно-библиотечное сопровождение научной деятельности.
4. Информационные системы для коллективной работы ученых.
5. Системы компьютерной поддержки научных исследований.
6. Системы хранения научных данных общего назначения.
7. Специализированное программное обеспечение для моделирования процессов и явлений.
8. Специализированные научные экспертные информационные системы.
9. Суперкомпьютерные вычисления на специализированных устройствах.

10. Суперкомпьютерные вычисления общего назначения.

11. Тематические базы данных.

В *приложении* представлены списки научных ИТ-сервисов, работа которых обеспечивается ресурсами МСЦ РАН (филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), ИВТ СО РАН и ВЦ ДВО РАН. Приведены наименования и краткие описания сервисов, указаны категории, к которым сервисы отнесены рабочей группой Комиссии по информатизации ФАНО России.

Ясно, что приведенный список категорий не является исчерпывающим и однозначным. Многие категории имеют частный характер, хотя их выделение обосновано наличием достаточного числа сервисов-представителей. При этом множество сервисов не удалось объединить в какие-либо специальные категории, и они были отнесены к категории иных научных ИТ-сервисов, которая названа "Системы компьютерной поддержки научных исследований". Несмотря на имеющиеся недостатки построенной классификации удалось оперативно решить задачу категоризации научных ИТ-сервисов в целях определения объемов финансовой поддержки, необходимой для обеспечения их работы. Для этого выделены наиболее часто встречаемые типы сервисов, выполнена оценка их ресурсоемкости и наукоемкости (табл. 1). Под наукоемкостью научного сервиса здесь и далее будем понимать необходимость использования труда научных работников, а под ресурсоемкостью — использования аппаратных и программных ресурсов, а также труда инженерного персонала.

Анализируя представленные списки сервисов и категорий сервисов, можно заметить, что

они существенно отличаются по наукоемкости, т.е. степени привлечения при их эксплуатации и создании научного труда (табл. 1). Наукоемкость ИТ-сервиса может возникать на этапе разработки, когда сама разработка и внедрение сервиса требуют решения новых научных задач, на этапе наполнения содержимым, как в случае тематических баз данных, когда добавляется содержимое, являющееся результатом научной деятельности, а также на этапе сопровождения, когда само использование сервиса требует научных консультаций, как, например, в случае с суперкомпьютерными вычислениями. Для упрощения последующей классификации в табл. 1 этапы "наполнение содержимым" и "сопровождение" объединены и названы просто "Сопровождение", что не должно привести к снижению качества классификации.

Рассмотрим подробнее вопрос ресурсоемкости ИТ-сервисов и для начала выделим набор сервисов, поддержка работоспособности которых требует скорее высококвалифицированной инженерной рабочей силы и особо не нуждается на этапе реализации и сопровождения в научных кадрах. Такие сервисы, как правило, являются и наиболее ресурсоемкими, так как требуют для своей работы дорогостоящего оборудования или внешних, приобретаемых услуг, а также существенных трудозатрат квалифицированных инженеров, как на этапе "создания", так и на этапе "поддержки".

В первую очередь, это базовые сервисы поддержки телекоммуникационной и вычислительной среды, такие как "Базовая информационно-телекоммуникационная инфраструктура для поддержки научных исследований", "Опорные

Таблица 1

Оценка наукоемкости и ресурсоемкости ИТ-сервисов по категориям

Наименование категории ИТ-сервисов	Наукоемкость		Ресурсоемкость	
	Разработка и развитие	Сопровождение	Создание и развитие	Поддержка работы
Автоматизированные комплексы для биологии и медицины	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Вспомогательная узкоспециализированная информационная система	Средняя/ Высокая	Средняя/ Высокая	Средняя/ Высокая	Низкая/ Средняя
Информационно-библиотечное сопровождение научной деятельности	Низкая	Низкая	Средняя	Низкая/ Средняя
Информационные системы для коллективной работы ученых	Низкая	Низкая	Средняя/ Высокая	Средняя
Системы компьютерной поддержки научных исследований	Низкая/ Средняя	Низкая/ Средняя	Средняя/ Высокая	Средняя/ Высокая
Системы хранения научных данных общего назначения	Средняя	Низкая	Высокая	Высокая
Специализированное программное обеспечение для моделирования процессов и явлений	Высокая	Средняя	Средняя/ Низкая	Средняя/ Высокая
Специализированные научные экспертные информационные системы	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая/ Средняя
Суперкомпьютерные вычисления на специализированных устройствах	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая
Суперкомпьютерные вычисления общего назначения	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая
Тематические базы данных	Низкая	Высокая	Средняя	Низкая

системы и компоненты информационно-телекоммуникационной инфраструктуры поддержки научных исследований" или "Система гарантированной передачи научных данных ("Федерация)"). С одной стороны, такие сервисы можно полностью передать на аутсерсинг соответствующим провайдерам, с другой стороны, практика показывает, что научные задачи требуют консолидации таких ресурсов, и более эффективно их можно использовать, в том числе закупать и поддерживать, при определенном уровне централизации. Кроме того, большая часть физической инфраструктуры, составляющей основу функционирования этих сервисов внутри научных центров, исторически формировалась и создавалась поддерживающими эти сервисы организациями во времена, когда само понятие "глобальные компьютерные сети" лишь начинало выходить за пределы научных лабораторий. Созданные в результате этой деятельности корпоративные академические компьютерные сети стали в свое время основной для организации междисциплинарного научного взаимодействия и развития научных исследований в целом. Это, в частности, подтверждается получением коллективом ученых из Сибири под руководством академика Ю. И. Шокина премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники 2012 г. за создание информационно-телекоммуникационной инфраструктуры междисциплинарных научных исследований как основы экономического и социального развития восточных регионов России [7], а в 2014 г. — получением аналогичной премии коллективом под руководством академика Г. И. Савина за комплекс научных, технических, технологических и организационных решений для обеспечения суперкомпьютерными технологиями и информационными ресурсами научных исследований и инновационных разработок [8]. Таким образом, наукоемкость этих сервисов является историческим фактом, а их значимость для выполнения современных научных исследований нельзя умалить.

Более высокоуровневые ИТ-сервисы, связанные с выделением вычислительных ресурсов и пространства для долговременного и краткосрочного хранения научных данных, могут быть реализованы различными способами, от простейших: путем предоставления прямого доступа к серверам и системам хранения данных (модель "инфраструктура как сервис" — IaaS), до более сложных: путем предоставления доступа к системам управления заданиями на вычислительных кластерах и grid-системах, к различным блочным, файловым и более высокоуровневым протоколам и API систем хранения, облачным системам управления ресурсами ЦОД и суперкомпьютерных центров, вплоть до систем виртуализации, СУБД и т.д. (модели "платформа как сервис" — PaaS и ее

производные: "базы данных как сервис" — DBaaS, "промежуточное программное обеспечение как сервис" — MWaaS и др.). Примерами таких сервисов являются "Сервис хранения научных данных" и "Суперкомпьютерные вычисления с массивным параллелизмом и хранение данных", "Система поддержки научных информационных сервисов".

В целом вокруг задач выделения вычислительных ресурсов и предоставления пространства для хранения и обмена данными можно построить целые иерархии сервисов, направленных на решение задач различных уровней. Так, в ИВТ СО РАН строится набор сервисов хранения, обмена и совместной работы с документами [9]. Нижним уровнем является сервис выделения пространства хранения научных данных через блочный либо файловый протоколы. Этот сервис ориентирован на монопольное пользование данными в рамках одного научного подразделения (коллектива) и долговременное хранение, включающее резервное копирование больших объемов данных. Следующий уровень — система обмена данными и совместной работы с документами на базе платформы Nextcloud, являющаяся аналогом Dropbox и Google Drive. Этот сервис предназначен для среднесрочного размещения не очень больших по объему данных и документов в целях обмена ими, а также для совместной работы с документами с поддержкой их версионности и встроенными веб-редакторами форматов Open Document. Верхним уровнем в этой иерархии должна стать интегрированная система хранения и анализа научных данных, которая объединит функционал электронной библиотеки с возможностями систем автоматического сбора научных данных и систем обработки и анализа данных.

Необходимо выделить ИТ-сервисы, которые способствуют выполнению научных исследований опосредовано, за счет решения организационных задач. Это сервисы обмена информацией и данными, в том числе доступа к библиотекам научных документов, совместной работы с документами, поддержки проведения научных мероприятий, организации проведения научных конкурсов и сбора информации о результатах научной деятельности, поддержки проектной, научно-издательской деятельности, в том числе научных журналов и др., такие как "Информационный сервис управления издательской деятельностью научной организации", "Информационная система управления научными проектами (ИС Грант)", "Система поддержки организации и проведения научных конференций". К ним относятся и сервисы поддержки передачи электронных сообщений и коллективных коммуникаций, такие как "Корпоративная коммуникационная система", построенная на платформе с открытым исходным кодом Zimbra и на платформе Microsoft и позволяющая организовывать общие про-

странства для обмена текстовой информацией, организовывать встречи и собрания, осуществлять оперативную аудио- и видеосвязь, многосторонние аудио- и видеоконференции. Такие сервисы часто не являются уникальными, но, тем не менее, играют важную роль в организации научной деятельности и взаимодействия научных групп и отдельных ученых.

Большая часть высокоуровневых научных ИТ-сервисов опирается на возможности перечисленных выше инструментов. Например, тематические базы данных задействуют сложный стэк ИТ-сервисов нижнего уровня. Они базируются на веб-платформах, роль которых обычно играют различные CMS (Content Management System — система управления содержимым веб-сайта), используя для размещения данных системы управления базами данных (СУБД). В свою очередь, CMS и СУБД размещаются на платформах виртуализации, использующих серверные ресурсы центров обработки данных (ЦОД или датацентр), а для размещения самих данных используются ресурсы систем хранения данных. При этом доступ к тематическим базам данных как для их пользователей, так и для поставщиков содержимого осуществляется через компьютерную сеть, при задействовании телекоммуникационных ресурсов инфраструктуры. Аналогичные стеки могут быть описаны для любого высокоуровневого научного ИТ-сервиса. Таким образом, вспомогательные и ненаучные ИТ-сервисы позволяют существенно упростить и ускорить процессы разработки новых научных ИТ-сервисов, а также их последующее сопровождение и поддержку. Отсюда вытекают и некоторые сложности в оценке стоимости научного ИТ-сервиса, так как их ресурсоемкость состоит и из ресурсоемкости используемых сервисов нижнего уровня.

#### 4. "Цена" научного ИТ-сервиса

Научный ИТ-сервис, как и любой другой ИТ-сервис, необходимо разработать, внедрить, сопровождать и развивать, тогда его можно будет эффективно использовать для решения актуальных научных задач. Соответственно, и "себестоимость" научного ИТ-сервиса будет складываться из стоимости каждого из этих этапов. Вопросы разработки и внедрения новых научных ИТ-сервисов целесообразно рассматривать в разрезе выполнения научно-исследовательских проектов, в частности, в рамках государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований. Дальнейший жизненный цикл этих продуктов научного труда традиционно выходит за рамки фундаментальных и даже прикладных научных исследований, становясь часто инженерной, вспомогательной задачей, которая обычно остается "за кадром" основной деятельности научных органи-

заций, из-за чего, собственно, пользователи быстро теряют интерес к большинству создаваемых научным сообществом ИТ-продуктов. Речь идет об этапах сопровождения работы и развития научных ИТ-сервисов.

Для поддержки работы научных ИТ-сервисов, безусловно, нужна аппаратная инфраструктура (серверы, их кластеры, системы хранения данных, компьютерные сети, инженерная часть центров обработки данных, включая системы энергоснабжения, охлаждения и пожаротушения) и телематические сервисы. С точки зрения финансовых затрат это наиболее ресурсоемкая составляющая стоимости сервисов. Однако потребности сервисов из разных категорий в таких ресурсах очень разнообразны. Сбалансировать их частично позволяет использование виртуальных машин вместо отдельных серверов и систем динамического выделения ресурсов. Наиболее эффективно такие инструменты начинают работать при определенном уровне централизации ресурсов. Нужно отметить, что некоторые виды ИТ-сервисов, например из категории "Специализированное программное обеспечение для моделирования процессов и явлений", могут потребовать ресурсов, которых нет ни у одного центра обеспечения (вычислительного центра, центра хранения и обработки данных), тогда необходимо "виртуально" объединять территориально распределенные ресурсы, что возможно только при наличии развитых сетей и телекоммуникационных ресурсов. Три ключевых типа ресурсов: телекоммуникационные, вычислительные и хранения, составляют основную часть "ресурсоемкости" сервиса как на этапе разработки и развития, так и на этапе поддержки работы. Необходимость поддержки работы этих базовых ресурсов квалифицированными ИТ-инженерами, стоимость труда которых сопоставима со стоимостью труда научных работников, а нередко и превышает ее, только увеличивает "себестоимость" ИТ-сервисов. Однако, как показывает анализ рынка подобных услуг (табл. 2), стоимость их аутсерсинга может быть существенно выше, чем в случае рациональной централизации таких ресурсов.

Научное сопровождение ИТ-сервисов, которое заключается в обучении и консультировании пользователей либо в совместном с ними решении их научных задач, является отдельной проблемой. Традиционно в российских научных организациях считается, что научный работник должен выполнять самостоятельные исследования, публиковать их результаты и продумывать вопросы их внедрения. В итоге труд научных работников по сопровождению научных сервисов, к которым относятся не только ИТ-сервисы, но и другие виды "услуг", например, по проведению экспериментов и испытаний, различных измерений, созданию научных приборов и систем,



## Оценка стоимости коммерческой аренды базовых информационно-вычислительных и телекоммуникационных ресурсов ИВТ СО РАН

Описание сервиса, тип	Единица измерения ресурса и количество	Стоимость поддержки*, млн руб. в год	Стоимость аренды аналога
Высокоскоростной обмен данными (специализированный 10 Gbit сегмент)	10 Gbit линии связи, 6 шт	—	» 3,5
Размещение оборудования в серверных залах/залах ЦОД	Серверные стойки, 40 шт.	—	> 12,0
Виртуализация информационно-вычислительных систем и инфраструктура как сервис (IaaS)	Серверы и кластеры, 20 шт.	—	> 3,5
Отказоустойчивое хранение данных**	Петабайт хранилища, 1,0/2,5	—	> 12,0/30,0
<b>ИТОГО</b>		13,8/22,3	> 31,0/49,0**
* Без учета/с учетом амортизации оборудования			
** 2017/2018 гг.			

в том числе программных, далеко не всегда получает должную оценку. В качестве возможного "поощрения" такого труда можно рассматривать включение выполняющих его научных работников в число соавторов публикаций, в которых используются результаты измерений, испытаний, экспериментов. Однако, не являясь основными авторами таких публикаций, они не всегда могут и претендовать на включение представленных в них результатов в свои квалификационные работы, диссертации. Это еще одна сторона "цены" научного ИТ-сервиса — трудовой ресурс высококвалифицированных научных работников.

По аналогии с любым другим продуктом, кроме себестоимости необходимо учитывать и востребованность научных ИТ-сервисов, которые, в совокупности, формируют некоторый аналог "рыночной цены" сервиса, а также уметь оценивать их "результативность". Востребованность сервиса можно оценивать по числу результативных обращений. Однако определение этого числа является одной из ключевых проблем ИТ-индустрии в целом, особенно ярко проявившей себя в области интернет-рекламы, а теперь и в области продвижения не только товаров, но и информации, идей, мнений, когда множество так называемых фэйковых (от англ. fake) действий осуществляется программными инструментами либо людьми, для которых генерация "фальшивых" действий (так называемых накруток) — это профессия.

Так, для ИТ-сервисов с авторизацией пользователя число зарегистрированных пользователей — лишь нулевое приближение к оценке эффективности. К нему долгое время апеллировали операторы мобильной связи, позже — владельцы информационных ресурсов для демонстрации собственной значимости, в том числе, чтобы заинтересовать рекламодателей. Но качество этой характеристики нивелировано современными технологиями генерации фальшивых пользователей и процессами "отмирания пользователей".

Достаточно быстро было осознано, что зарегистрированный пользователь совсем не обязательно пользуется ресурсом. Появилось понятие "активный пользователь" — пользователь, который за определенный период хотя бы однажды авторизуется в системе или производит хоть одно действие, например телефонный звонок или отправку сообщения. Со временем активность зарегистрированных пользователей стала детально отслеживаться и изучаться владельцами информационных ресурсов и сервисов, выделившись в отдельную индустрию, изначально ориентированную именно на рекламный рынок.

В случае с научными ИТ-сервисами верификация пользователей все еще может быть организована достаточно эффективно для того, чтобы можно было использовать характеристики "число зарегистрированных пользователей" и "число активных пользователей" для оценки востребованности того или иного ИТ-сервиса. Однако и этот подход, не говоря уже о более сложных методах учета (аккаунтинга) действий пользователей, может стать для научного ИТ-сервиса отдельной сложной проблемой, решение которой, особенно с учетом отсутствия монетизации (так как она не является главной целью разработки и внедрения научного ИТ-сервиса, главной целью является применение таких сервисов при решении научных задач для генерации нового научного знания), выходит за рамки интересов разработчиков и даже обеспечивающих работоспособность структур. Тем не менее, есть пример научных ИТ-сервисов, где аккаунтинг является достаточно проработанным вопросом — это суперкомпьютерные вычисления. Так как традиционно суперкомпьютерные ресурсы являются "дефицитным" продуктом, т. е. желающих воспользоваться им больше, чем имеется возможностей, а также потому, что очень быстро возникла необходимость sharing'a — одновременного совместного использования этих ресурсов, воз-

никло и желание повысить эффективность освоения суперкомпьютеров путем введения автоматизированных или полностью автоматических систем управления заданиями и, соответственно, учета использования ресурсов. Аналогичная проблема была решена для телекоммуникационных ресурсов по заказу операторов связи, для которых это уже был вопрос, напрямую связанный с монетизацией их услуг. В настоящее время можно считать решенной и проблему учета использования основных "облачных" ресурсов (пространств для хранения данных, серверных ресурсов) как исчислимых (Терабайты хранилища \* часы/сутки/месяцы, Гигагерцы \* ядра CPU/GPGPU \* часы, Гигабайты RAM \* часы и др.). Конечно, качественная система учета использования компьютерных или телекоммуникационных ресурсов и сейчас является очень дорогостоящим продуктом, приобретение которого имеет смысл только тогда, когда речь идет о монетизации этих ресурсов. Соответственно, закладывая определенный уровень рентабельности, стоимость владения, скорость амортизации, владелец переводит эти характеристики в "рубли". Но может ли позволить себе сделать то же самое наука, когда речь идет о ресурсах для научных исследований, результаты которых далеко не всегда измеряются рублями?

Другая сторона организации учета использования научных ИТ-сервисов на основе авторизации связана с необходимостью построения единой системы для всего стэка ИТ-ресурсов, задействуемого этими сервисами. Это прямое следствие того, что ИТ-сервисы могут быть взаимозависимы, и совершенно однозначно, что любой ИТ-сервис использует ресурсы базовых сервисов, при этом с различной интенсивностью. Таким образом, для того, чтобы корректно оценивать востребованность тех или иных ИТ-сервисов и распределять на основе этой оценки ресурсы поддержки, необходимо учесть использование всех задействованных при обращении к конкретному ИТ-сервису ресурсов, представленных также в форме ИТ-сервисов. Нужно помнить и тот факт, что различные базовые ресурсы могут принадлежать/управляться различными поставщиками. Это делает систему учета еще более сложной и дорогостоящей как в разработке, так и в эксплуатации, в том числе за счет повышения трудоемкости ее внедрения и сопровождения.

Еще один важный момент заключается в том, что аутентификация и авторизация снижает удобство использования, а иногда даже противоречит условиям опубликования результатов исследований. Научное сообщество постепенно движется к реализации парадигмы открытых данных [11], что позволит не только верифицировать результаты и выводы, которые делают другие научные коллективы, но и, формируя сложные пулы и иерархии данных, получать из них новые знания,

которые невозможно получить, пользуясь данными из одного источника. Этот тренд в некотором плане дополнительный к тому, что наблюдается в физике элементарных частиц, при котором множество групп исследователей, опираясь на одни и те же данные, ставшие "общим достоянием" (полученные с сенсоров БАК и аналогичных коллаборативных проектов), исследуют различные аспекты одного явления или даже один аспект, распараллеливая решение высокоресурсоемких задач анализа огромных объемов данных. Имея возможность создавать сложные композиции источников данных, исследователь сможет творчески перерабатывать их, извлекая из них новую информацию, новые знания. В этом случае любое ограничение на доступ к данным и механизмам их обработки отрицательно повлияет на научный прогресс, замедляя его. Именно поэтому ряд значимых научных изданий, например PLOS, уже начали требовать открытия данных, на которых основаны публикуемые результаты исследований, предоставляя для этого и специализированные ресурсы [12, 13], а в ряде случаев прямо требуется наличие возможности не ограниченного даже простой аутентификацией свободного доступа к сервисам и ресурсам, как для системы "GTRD — Gene Transcription Regulation Database" [13].

## Выводы и заключение

Поддержка и развитие инфраструктуры научных исследований является одной из важнейших проблем современной науки и научного сообщества. Наличие современной аппаратной и программной базы — необходимое условие проведения исследований на передовом крае мировой науки. Цифровые данные — ключевой драйвер современной науки, а научные коммуникации, без которых невозможно представить научное сообщество, существенно опираются на возможности, предоставленные новыми ИТ. Поэтому информационно-телекоммуникационные и вычислительные ресурсы как основной элемент киберинфраструктуры науки и ИТ-сервисы как форма предоставления доступа к этим ресурсам стали неотъемлемой частью инфраструктуры научных исследований.

Построенная и использованная ФАНО России в 2016 и 2017 гг. система оценки полезности информационно-телекоммуникационной инфраструктуры на основе востребованности научных ИТ-сервисов позволила сделать еще один важный шаг в направлении развития киберинфраструктуры науки. В ходе работы с этой системой выявлен ряд значительных недостатков, среди которых, в частности, отсутствие учета ресурсоемкости ИТ-сервисов, их наукоемкости и результативности, под которой можно понимать

результативность исследований, выполняемых на основе этих ИТ-сервисов. Построенная классификация сервисов также несовершенна и требует значительной доработки. В частности, она все еще позволяет отнести один и тот же сервис в разные категории, а в рамках одной категории есть сервисы, существенно отличающиеся по таким важным характеристикам, как наукоемкость и ресурсоемкость. Тем не менее, эта система стала определенной вехой, позволившей сохранить накопленный научно-технический потенциал в области ИТ-сопровождения научных исследований, утрата которого может стать невосполнимой для всей российской науки.

Предлагаемые специализированными научными организациями научные ИТ-сервисы покрывают широкий спектр потребностей российской науки в информационных, вычислительных и телекоммуникационных ресурсах. Их востребованность растет по мере осознания российским научным сообществом важности цифровых научных данных, обеспечения их сохранности, необходимости создания и развития методов, программных и программно-аппаратных систем для их обработки и анализа. Уже решенные этими своеобразными "сервис-провайдерами" задачи во многом предвосхитили и опередили потребности российского научного сообщества, совершая своеобразное "принуждение к инновациям", способствуя ускоренному включению в общемировое исследовательское поле в его самых современных формах.

Тем не менее, вопрос о формах поддержки развития и содержания киберинфраструктуры науки в России, о ценности тех или иных решений, которые она предоставляет, остается открытым. Ценность научных ИТ-сервисов, безусловно, должна выражаться в тех научных результатах, которые получены с их помощью, а необходимость поддержки должна оцениваться на основе соотношения стоимости содержания и развития к ценности, определяемой востребованностью и результативностью. Однако нельзя забывать и об эффекте "малых величин", в частности ИТ-сервисов, прямые эффекты от которых не столь заметны, но выявить которые, оценить их значимость и указать на необходимость учета которых — важнейшая задача научных экспертов, так как пренебрежение такими "малыми величинами" может иметь огромное влияние, в нашем случае — на возможность и эффективность решения наиболее актуальных научно-технических проблем.

**Благодарности.** Автор благодарит к. т. н. А. А. Сорокина, к. т. н. Б. М. Шабанова, М. М. Харций и других членов Комиссии по информатизации ФАНО России за полезные дискуссии, способствовавшие подготовке материалов статьи, формулировке проблематики и задач, а также формированию представленных решений. Особую признатель-

ность автор выражает академику Ю. И. Шокину за всестороннюю поддержку проводимой работы, критическую оценку результатов, конструктивные замечания и предложения, которые позволили существенно улучшить представленный материал.

#### Список литературы

1. Microsoft Azure for Research. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/academic-program/microsoft-azure-for-research/> (дата доступа 27.12.2017).
2. Press Briefing by Richard Clarke, National Coordinator for Security, Infrastructure Protection and Counter-terrorism; and Jeffrey Hunker, Director of the Critical Infrastructure Assurance Office. News release. The White House Office of the Press Secretary. May 22, 1998. URL: <https://fas.org/irp/news/1998/05/980522-wh3.htm> (дата доступа 27.12.2017).
3. Bottum J. R., Davis J. F., Siegel P. M., Wheeler B., Oblinger D. G. Cyberinfrastructure: In Tune for the Future // *Educare Review*. 43 (4). Jul/Aug. 2008. URL: <https://web.archive.org/web/20080907155037/http://connect.educause.edu/Library/EDUCAUSE%2BReview/CyberinfrastructureInTune/46966> (дата доступа 27.12.2017).
4. Newman H. B., Ellisman M. H., Orcutt J. A. Data-Intensive e-Science Frontier Research in the Coming Decade // *Communications. Association for Computing Machinery*. Nov. 2003. 46 (11). CiteSeerX 10.1.1.72.5841. Freely accessible. DOI: 10.1145/948383.948411.
5. Абрамов С. М., Заднепровский В. Ф., Московский А. А. Отечественные Супер-ЭВМ и грид-системы. Проблемы развития национальной киберинфраструктуры в России // Тр. XII Научно-практической конференции Университета города Переславля. Переславль-Залесский, 2008. С. 1—27. URL: <http://www.botik.ru/PSI/RCMS/publications/publ-texts-2008/supercomputers-grid-systems.pdf> (дата доступа 27.12.2017).
6. Шокин Ю. И., Федорук М. П., Чубаров Д. Л., Юрченко А. В. О развитии инфраструктуры суперкомпьютерных и распределенных вычислений в СО РАН // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2011. № 3. С. 9—19.
7. Распоряжение Правительства РФ от 27 февраля 2013 г. № 254-р "О присуждении премий Правительства Российской Федерации 2012 года в области науки и техники". URL: <http://government.ru/docs/643/> (дата доступа 27.12.2017).
8. Распоряжение Правительства РФ от 26 февраля 2015 г. № 303-р "О присуждении премий Правительства Российской Федерации 2014 года в области науки и техники". URL: <http://government.ru/docs/all/95036/> (дата доступа 27.12.2017).
9. Юрченко А. В. К концепции информационно-аналитической системы поддержки научных исследований, основанных на интенсивном использовании цифровых данных // *Вычислительные технологии*. 2017. Т. 22, № 4. С. 105—120.
10. Nathan L. Yo., Stephen F. S., Pardis C. S. Data sharing: Make outbreak research open access // *Nature*. 2015. Vol. 518, Iss. 7540. P. 477—479.
11. Lowenberg D., Ross A., Ganley E. Introducing the PLOS Open Data Collection // *PLOS Collections in Open Data*. 2016. Nov. 10.
12. Haendel M., Vasilevsky N. Data sharing in a modern world; well, maybe not so modern, redux // *PLOS Collections in Open Data*. 2017. Nov. 13.
13. Yevshin I., Sharipov R., Valeev T., Kel A., Kolpakov F. GTRD: a database of transcription factor binding sites identified by ChIP-seq experiments // *NUCLEIC ACIDS RESEARCH*. 2017. Vol. 45, D1. P. D61—D67. DOI: 10.1093/nar/gkw951

# Приложение.

## Списки научных ИТ-сервисов, предоставляемых МСЦ РАН, ИВТ СО РАН, ВЦ ДВО РАН

Таблица 3

ИТ-сервисы МСЦ РАН — филиала ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (Москва)

Наименование	Краткое описание	Кат.
Сервис доступа к электронным каталогам журналов и книг БЕН РАН	Доступ онлайн к электронным каталогам БЕН РАН	3
Распределенный читальный зал БЕН РАН	Доступ к платформам зарубежных издательств, доступных в институтах РАН через распределенный читальный зал РАН	3
Сервис доступа к информационной системе "Волоконная оптика"	Информационная система "Волоконная оптика" включает электронную библиотеку научной литературы по фундаментальным и прикладным проблемам волоконной оптики; труды сотрудников Научного центра волоконной оптики РАН; информационные материалы по применению волоконной оптики и связанным с нею производствам	3
Сервисы "Наблюдательные данные ПРАО" и "Рабочая среда радиоастронома"	Доступ к данным наблюдений Пушинской радиообсерватории	11
Сервисы "Геофизические данные ИЗМИРАН"	Доступ к данным о вариациях магнитного поля Земли, метеоданным, данным зондирования ионосферы и прогнозу солнечной активности	11
Сервис "База данных двойных звезд"	Сервис онлайн-доступа к астрономическим и астрофизическим базам данных	11
Сервис доступа к базе данных VALD3	Сервис онлайн-доступа к базе данных "Vienna Atomic Lines Database"	11
Сервис доступа к базе данных SAO/NASA Astrophysics Data Systems	Сервис онлайн-доступа к базе данных по физике и астрономии SAO/NASA Astrophysics Data Systems	11
Информационная система сопровождения и предоставления цифровых информационных ресурсов	Телекоммуникационный сервис доступа к информационным ресурсам и информационной системе поддержки научных исследований и образовательных программ	5
Сервис формирования и описания баз данных цифровых объектов	Формирование и сопровождение электронных информационных ресурсов	5
Сервис формирования тематических электронных коллекций и виртуальных выставок	Формирование баз данных и тематических коллекций из научных фондов организаций ФАНО России	5
Сервис интеграции цифровых фондов организаций ФАНО России	Сбор, обработка и интеграция цифровых объектов, предоставляемых организациями, подведомственными ФАНО России	5
Сервис распределенного долговременного хранения данных цифровых фондов и тематических коллекций	Обеспечение хранения, сохранности и доступности распределенных цифровых фондов и тематических коллекций	5
Предоставление высокоскоростного доступа к суперкомпьютерным ресурсам МСЦ РАН	Предоставление высокоскоростного доступа к суперкомпьютерным ресурсам МСЦ РАН через сетевую инфраструктуру МСЦ РАН	5
Предоставление высокоскоростного доступа к распределенной инфраструктуре обработки данных БАК	Предоставление высокоскоростного доступа через волоконно-оптические каналы связи и виртуальные локальные сети к распределенной инфраструктуре обработки данных БАК	5
Удостоверяющий сервис EDUROAM	Удостоверяющая инфраструктура для взаимной авторизации пользователей беспроводных сетей, часть международной инфраструктуры EDUROAM	5
Телематический сервис научных организаций	Предоставление службы сервисов доменных имен, адресов	5
Хостинг информационных сервисов и систем научных организаций	Предоставление услуги размещения и поддержки оборудования, предоставление каналов связи для научных организаций, предоставляющих информационные сервисы	5
Сервис организации вычислений с массивным параллелизмом на основе программно-обеспечения для моделирования процессов и явлений	Организация вычислений с использованием прикладных программ моделирования процессов и явлений на универсальных высокопроизводительных ресурсах с использованием решающего поля на основе процессоров общего назначения	7
Суперкомпьютерные вычисления с массивным параллелизмом и хранение данных	Предоставление вычислительных ресурсов для универсальных высокопроизводительных вычислений с использованием решающего поля на основе процессоров общего назначения	10

## ИТ-сервисы ИВТ СО РАН (Новосибирск)

Наименование	Краткое описание	Кат.
Активный архив информационных продуктов на основе данных сенсора MODIS	Предоставление доступа к архиву информационных продуктов, генерируемых в оперативном и архивном режимах на основе данных сенсоров, установленных на спутниках Terra, Aqua, NPP Suomi, поступающих с нескольких приемных комплексов	11
Архив спутниковых данных SPOT 4	Предоставление доступа к архиву данных дистанционного зондирования системы SPOT 4	11
Web-трансляция научных мероприятий	Организация Web-трансляции различных научных мероприятий: семинаров, конференций, совещаний, диссертационных советов	4
Система видеоконференцсвязи СО РАН	Трансляция и многосторонняя связь для научных мероприятий, конференций, заседаний Президиума СО РАН, совещаний ОУС	4
Информационная система CRIS	Учет научных публикаций, конференций, проектов, персон и организаций. Генерация отчетов	3
Корпоративная коммуникационная система	Поддержка индивидуальных и коллективных коммуникаций между учеными и научными коллективами: электронная почта, аудио- и видеосвязь, видеоконференции, обмен сообщениями	5
Распределенная система ZooSPACE	Доступ к распределенным научно-библиотечным информационным ресурсам и базам данных (Новосибирск, Иркутск, Томск, Красноярск)	3
Сервер интерактивных вычислений Jupyter Notebook	Выполнение научных расчетов с использованием специализированных библиотек языка Python в интерактивном режиме с поддержкой возможностей совместной работы	10
Система виртуализации научных информационных систем	Размещение научных информационных сервисов и систем в высоконадежной кластерной системе виртуализации с выделением дискового пространства	6
Система поддержки организации и проведения научных конференций	Информационная система "Конференции" предназначена для комплексной поддержки организации и проведения научных конференций	3
Система хостинга научных информационных ресурсов	Размещение научных информационных веб-ресурсов и систем на основе открытых программных платформ	5
Опорные системы и компоненты информационно-телекоммуникационной инфраструктуры поддержки научных исследований	Ключевые компоненты системы обмена данными и информацией через локальные и глобальные компьютерные сети	5
Высокоскоростной обмен научными данными (специализированный 10 Gbit сегмент)	Обмен научными данными через высокоскоростную телекоммуникационную инфраструктуру — 10 Gbit технологический сегмент ККС (доступно в Новосибирском, Красноярском, Томском, Кемеровском и Иркутском научных центрах)	5
Информационная система поддержки деятельности научного журнала	Сервис поддержки деятельности научных журналов на основе open source платформ (OJS или др.) с электронной редакцией (прием рукописей, организация их рецензирования и отслеживания прохождения, публикация материалов в соответствии с международными стандартами)	3
Сервис хранения научных данных	Хранение научных данных на высоконадежной СХД с доступом по файловым или блочным протоколам	6
Сервис обмена и совместной работы с научными документами	Web-сервис для размещения научных документов и управления доступом к ним на основе open source платформы (аналог DropBox)	3
GTRD — Gene Transcription Regulation Database	База данных результатов транскрипции (ChIP-seq) генов мыши и человека	11
Платформа для анализа биомедицинских данных BioUML	Поиск и визуализация данных из биологических баз данных, статистический анализ биологических данных, анализ биологических данных через Galaxy, моделирование биологических систем	11
Цифровые репозитории результатов научной деятельности	Цифровые архивы полнотекстовых научных документов, публикаций и пр.	3

## ИТ-сервисы ВЦ ДВО РАН (Хабаровск)

Наименование	Краткое описание	Кат.
Базовая информационно-телекоммуникационная инфраструктура для поддержки научных исследований	Доступ к научным информационным системам и сервисам, ресурсам ЦКП, а также обмен научными данными в рамках Дальнего Востока России	5
Система гарантированной передачи научных данных ("Федерация")	Взаимное использование ресурсов крупнейших суперкомпьютерных центров, ЦКП, информационных систем и хранилищ данных (Центральный регион, Сибирь, Дальний Восток)	5
Система поддержки научных информационных сервисов	Обеспечение функционирования научных информационных сервисов в интересах организаций, подведомственных ФАНО России (виртуальные машины, Web-серверы и т.п.)	5
Информационная система управления научными проектами (ИС Грант)	Система предназначена для управления научными проектами в ДВО РАН	8
Информационный сервис "Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил" VolSatView	VolSatView обеспечивает специалистов-вулканологов оперативными спутниковыми данными среднего разрешения и различными информационными продуктами, получаемыми на основе их обработки, для мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил. Кроме этого, в ИС создан и постоянно пополняется архив спутниковых данных высокого разрешения, позволяющий анализировать различные продукты извержений вулканов (отложения лавовых и пирокластических потоков и др.). Система позволяет работать как с оперативными, так и с архивными данными, накапливаемыми в VolSatView, а также с данными ЦКП "ИКИ-Мониторинг", Объединенной системы работы с данными центров НИЦ "Планета", геопортала ГК "Роскосмос", АИС "Сигнал"	5
Информационный сервис "ВЕГА — Дальний Восток"	Сервис создан для обеспечения доступа к данным распределенной информационной системы коллективного использования данных космического дистанционного зондирования Земли (ИСКИ ДЗЗ) для проведения научной, образовательной и инновационной деятельности в области исследования и контроля состояния окружающей среды в регионах Дальнего Востока России. В настоящее время система ориентирована на предоставление пользователям, ведущим научные исследования на территории Дальневосточного региона, как архивных, так и оперативных спутниковых данных и результатов их обработки. Пользователи Вега ДВ имеют возможности работать с архивами информации, полученной на основе данных спутников NOAA, Метеор М № 1, Terra, Aqua, Landsat и др., а также метоинформацией. Система обеспечивает возможность работы с более чем 10-летними архивами данных	5
Автоматизированная информационная система "Сигнал"	АИС обеспечивает единую информационную среду для работы с данными различных сетей инструментальных наблюдений (видео, геодинамическая т.п.) ДВО РАН и управления их ресурсами. Система осуществляет работу в реальном времени с 30 пунктами наблюдений на территории Дальнего Востока. В состав АИС входят сервисы специализированной обработки данных и математического моделирования	7
Сахалинский сейсмологический сервис	Сейсмический мониторинг о-ва Сахалин и прибрежного шельфа, исследования и получение научной информации о землетрясениях	5
Информационный сервис для исследования и мониторинга вулканической активности Центральных и Южных Курил	Мониторинг и исследование вулканической активности Курильских островов	5
Геоинформационная система "Природные ресурсы Магаданской области"	Целью проекта является публикация геопространственных баз данных по геологии, минеральным ресурсам и биоразнообразию Магаданской области; организация доступа к просмотру и редактированию баз данных; также создание инструментов пространственного анализа геоданных через интерактивный графический Web-интерфейс посредством геоинформационных технологий	5
Геопортал ИВиС ДВО РАН	Тематический Web-портал, обеспечивающий единую точку доступа к вулканологическим и сейсмологическим пространственным данным и сервисам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Включает каталог метаданных для поиска данных, картографический сервер для публикации пространственных данных, картографические WMS и WFS сервисы визуализации пространственных данных. Предоставляет доступ к коллекциям данных — Web-ориентированным базам данных и информационным системам	5

Наименование	Краткое описание	Кат.
Репозиторий ИВиС ДВО РАН	Электронный архив документов научного и образовательного назначения, произведенных сотрудниками учреждений Камчатского научного центра ДВО РАН	3
Информационная система "Вулканы Курило-Камчатской островной дуги" (VOKKIA)	VOKKIA предназначена для систематизации и интеграции геологических, геофизических, геохимических и других научных данных по наземным и подводным вулканам Курило-Камчатской островной дуги и омывающих ее морей	5
Автоматизированная аналитическая система Группы реагирования на вулканические извержения KVERT	Исследования и мониторинг активности вулканов Камчатки и Северных Курил	5
Информационная издательская система ИВиС ДВО РАН	Предназначена для подготовки и публикации научных журналов ИВиС ДВО РАН: "Вулканология и сейсмология"; "Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле" и материалов ежегодных конференций ИВиС ДВО РАН	3
Информационный сервис управления издательской деятельностью научной организации	Информационный сервис для управления издательской деятельностью научной организации	3
Автоматизированная система для ведения архивов научной организации	Информационная система для ведения архива научной организации	3
Медиаархив ДВО РАН	Система предназначена для трансляции и публикации медийных научных материалов в интересах организаций, подведомственных ФАНО России	4
Распределенные информационные сервисы для работы с данными дистанционного зондирования Земли (Центр коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг" и сопряженные информационные системы) (инфраструктура на Дальнем Востоке и в Сибири)	Обеспечение доступа к большим, многолетним архивам спутниковых данных, различным информационным продуктам, получаемым на их основе, а также к вычислительным ресурсам, позволяющим проводить их анализ и обработку. Доступ обеспечивается через ИС "Вега-Science", а также посредством различных программных интерфейсов	5
АСОМБИ	Сбор и статистический анализ медико-биологической информации	1
Электронные каталоги научной библиотеки ИВиС ДВО РАН	Библиотечное сопровождение научной деятельности	3
Система видеоконференцсвязи ДВО РАН	Обеспечение коллективной работы ученых для проведения научных исследований посредством различных информационных сервисов (видео, презентации и т.п.)	4

**A. V. Yurchenko**, PhD, first deputy director, e-mail: yurchenko@ict.nsc.ru  
Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
(Institute of Computational Technologies SB RAS), Novosibirsk, Russia

## On the Approach Considering Scientific IT-Service as a Base Unit for Cyberinfrastructure of Science

*Purpose of the study is to consider some problems of developing the information, computing and telecom infrastructure for scientific research. Significance of such infrastructure is well understood, but in Russian Federation there is still no common approach and no institutions for its support. We are basing on the scientific IT-service as a key unit for accounting of usage of such infrastructure. We are describing notions for scientific cyberinfrastructure, scientific IT-service and their components and stating relations between them. We are considering peculiarities of such services classification and estimation of their cost. Examples of scientific IT-services provided by main academic IT-providers and available for FASO Russia's organizations are listed and parsed. Being decomposed any of these services leads to basic ones and that makes us to search for ways to assess their science intensity and resource intensity. Corresponding estimation for different service categories is done. Also, the cost of support for the part of considered cyberinfrastructure is compared to some commercial analogues. Finally, after showing the importance of the problem of scientific cyberinfrastructure support we are stating the problem of developing a common approach to that support using the IT-service as a basic unit and taking into account the experience gathered by the workgroup of the FASO's Commission on information for the assessment of applications for support of ITCI. Obtained results will be useful for developing the strategy of building the cyberinfrastructure of Russian science and for advancing the accounting technologies of relevance and usefulness of that infrastructure and its components.*

**Keywords:** cyberinfrastructure of science, scientific IT-service, science intensity and resource intensity of IT-service, relevance and usefulness of scientific IT-service, scientific IT-services classification

### References

1. **Microsoft** Azure for Research, available at: <https://www.microsoft.com/en-us/research/academic-program/microsoft-azure-for-research/> (accessed December 29, 2017).
2. **Press** Briefing by Richard Clarke, National Coordinator for Security, Infrastructure Protection and Counter-terrorism; and Jeffrey Hunker, Director of the Critical Infrastructure Assurance Office. News release. The White House Office of the Press Secretary, 1998, May 22, available at: <https://fas.org/irp/news/1998/05/980522-wh3.htm> (accessed December 29, 2017).
3. **Bottum J. R., Davis J. F., Siegel P. M., Wheeler B., Oblinger D. G.** Cyberinfrastructure: In Tune for the Future, *Educause Review*, 43 (4), Jul/Aug. 2008, available at: <https://web.archive.org/web/20080907155037/http://connect.educause.edu/Library/EDUCAUSE%2BReview/CyberinfrastructureInTune/46966> (accessed December 29, 2017).
4. **Newman H. B., Ellisman M. H., Orcutt J. A.** Data-Intensive e-Science Frontier Research in the Coming Decade, *Communications. Association for Computing Machinery*, 46 (11), Nov. 2003, CiteSeerX 10.1.1.72.5841, Freely accessible, DOI: 10.1145/948383.948411.
5. **Abramov S. M., Zadneprovskii V. F., Moskovskii A. A.** Otechestvennye Super-EVM i grid-sistemy. Problemy razvitiya natsional'noj kiberinfrastruktury v Rossii (Russian supercomputers and grid-systems. Problems of the national cyberinfrastructure in Russia), *Trudy XII-oy Nauchno-prakticheskoy konferentsii Universiteta goroda Pereslavlja* (Proc. of XII-th Scientific-practical conference at the Pereslavl' University), Pereslavl'-Zalesskii, 2008, pp. 1—27, available at: <http://www.botik.ru/PSI/RCMS/publications/publ-texts-2008/supercomputers-grid-systems.pdf> (accessed December 27, 2017) (in Russian).
6. **Shokin Yu. I., Fedoruk M. P., Chubarov D. L., Yurchenko A. V.** O razvitiy infrastrukturnykh superkomp'yuternykh i raspredelennykh vychislenij v SO RAN (Development of the supercomputing and distributed computing infrastructure in the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), *Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nye Sistemy* (Information Technologies and Computing Systems), 2011, no. 3, pp. 9—19.
7. **Order** of February 27, 2013 number 254-r of the Government of the Russian Federation "On awarding the prizes of the Government of the Russian Federation in 2012 in the field of science and technology", available at <http://government.ru/docs/643/> (accessed December 27, 2017, in Russian).
8. **Order** of February 26, 2015 number 303-r of the Government of the Russian Federation "On awarding the prizes of the Government of the Russian Federation in 2014 in the field of science and technology", available at <http://government.ru/docs/all/95036/> (accessed December 27, 2017, in Russian).
9. **Yurchenko A. V.** K kontseptsii informatsionno-analiticheskoy sistemy podderzhki nauchnykh issledovaniy, osnovannykh na intensivnom ispol'zovanii tsifrovyykh dannykh (On the concept of information-analytical system for supporting data intensive science), *Vychislitel'nye Tekhnologii* (Computational Technologies), 2017, vol. 22, no. 4, pp. 105—120.
10. **Nathan L. Yo., Stephen F. S., Pardis C. S.** Data sharing: Make outbreak research open access, *Nature*, 2015, vol. 518, iss. 7540, pp. 477—479.
11. **Lowenberg, D., Ross, A., Ganley, E.** Introducing the PLOS Open Data Collection, *PLOS Collections in Open Data*, 2016, Nov. 10.
12. **Haendel M., Vasilevsky N.** Data sharing in a modern world; well, maybe not so modern, redux, *PLOS Collections in Open Data*, 2017, Nov. 13.
13. **Yevshin I., Sharipov R., Valeev T., Kel A., Kolpakov F.** GTRD: a database of transcription factor binding sites identified by ChIP-seq experiments, *NUCLEIC ACIDS RESEARCH*, vol. 45, D1, 2017, pp. D61—D67, DOI: 10.1093/nar/gkw951



**Ю. Г. Сметанин**, д-р. физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., e-mail: ysmetanin@rambler.ru,  
ФИЦ ИУ РАН (ВЦ РАН),

**М. В. Ульянов**, д-р. техн. наук, проф., e-mail: muljanov@mail.ru, вед. науч. сотрудник, проф.,  
ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, ВМК МГУ им. М. В. Ломоносова,

**А. С. Пестова**, магистрант,  
НИУ ВШЭ

## О числе возможных реконструкций слов по подсловам при окне переменного сдвига

*Исходными объектами в данной статье являются конечные слова над бинарным алфавитом. Эти слова представляют собой символные коды исследуемых объектов и процессов. В предположении о том, что исследователю известны лишь фрагменты (подслова) таких описаний, интерес представляет задача восстановления полного кода. С точки зрения комбинаторики слов восстановление описания на основе разрозненных фрагментов наблюдений представляет собой задачу реконструкции слова по известным подсловам. Для ее решения необходимо принять гипотезу о значении сдвига окна, порождающего данные подслова. Очевидно, что такая реконструкция может быть множественной. В статье предлагается оценка зависимости математического ожидания числа возможных реконструкций от значения параметра сдвига.*

**Ключевые слова:** слова над конечным алфавитом, окно произвольного сдвига, реконструкция слов, оценка числа реконструкций

### Введение

Описание входной информации в терминах слов над фиксированным алфавитом возникает во многих задачах, в которых для исследования некоторых качественных свойств анализируемых систем или процессов можно использовать упрощенные символные модели. Дискретизация во временной области и описание анализируемых систем словами, в которых символы соответствуют состояниям системы по квантам времени, дает возможность исследовать такие свойства, как периодичность, среднее время пребывания в определенных состояниях и т. д., без построения полной модели системы. Этот подход является предметом исследований в символической динамике [1]. Его реализация связана с решением ряда комбинаторных задач, чем вызвано появление комбинаторики слов как особой научной дисциплины, главная задача которой — изучение слов как самостоятельного объекта с точки зрения их внутренней структуры [2]. Многие важные результаты, которые можно отнести к комбинаторике слов, были получены ранее в теории чисел, теории групп, теории вероятностей, кодировании. Исследования в комбинаторике слов часто связаны с взаимопроникновением методов из этих областей в целях создания новых подходов к решению задач.

Результаты реконструкции слов по частичной информации, полученные методами комбинаторики слов, эффективно используются при решении задач кодирования [3—5] и распознавания образов [6—8], задач биоинформатики, в том числе задач анализа последовательностей протеинов [9] и комбинаторного синтеза ДНК (геномной сборки) [10], а также при решении широкого круга задач символического анализа динамических систем [11].

Отметим, что кодирование и распознавание образов являются в некотором смысле предельными случаями реконструкции слов: задачу построения кодов можно считать задачей определения множеств слов, восстанавливаемых по единственному искаженному образцу при искажениях заданного вида, в то время как задачи реконструкции с неформальным описанием классов слов относятся к группе задач распознавания.

При решении задач символического анализа динамических систем возникающие символные описания временных рядов, описывающие состояния системы по квантам времени, могут быть как неполными, так и искаженными и фрагментарными. При этом задача анализа вре-

менных рядов на основе разрозненных фрагментов наблюдений с точки зрения комбинаторики слов представляет собой задачу реконструкции слова по известным подсловам. Решение этой задачи позволяет восстановить описание временного ряда по наблюдаемым фрагментам.

Еще одной из возможных областей применения методов реконструкции слов является применение современных информационных технологий в анализе бизнес-процессов. При описании бизнес-процессов в терминах графов [12] состояния процесса кодируются именованными вершинами, а переходы состояний — ребрами, отождествленными с этапами бизнес-процесса. При этом запись конкретной реализации бизнес-процесса есть некоторое слово над алфавитом имен вершин, отражающее порядок перехода состояний. Проблема реинжиниринга бизнес-процессов связана с задачами восстановления процесса по его известным фрагментам. Задача реконструкции бизнес-процесса возникает в связи с потерей или искажением информации о бизнес-процессе в целом, т. е. потерей слов — описаний конкретных реализаций. Актуальность проблемы реинжиниринга связана с быстрой адаптацией к часто меняющемуся рынку и выстраиванием наиболее эффективной работы организации. В этой проблематике аппарат комбинаторики слов также может быть эффективно использован для исследования бизнес-процессов [13].

В большинстве практических применений входные данные рассмотренных выше задач представляют собой фрагменты слов над некоторым конечным алфавитом. Основная проблема связана с фрагментарностью и неизвестным взаиморасположением фрагментов. Корректное описание такого взаиморасположения естественно приводит к рассмотрению окна со скользящим сдвигом. Движение такого окна вдоль неизвестного слова и порождает наблюдаемый набор подслов, соответствующих фрагментарному описанию. Именно в этих условиях ставится задача реконструкции неизвестного слова, решение которой, как правило, приводит к множеству возможных реконструкций.

Решение задачи реконструкции при единичном сдвиге и фиксированной ширине окна предложено авторами в работе [14]. Обобщение этого решения на случай произвольного фиксированного сдвига основано на простой модификации предложенного метода и не представляет трудностей.

В прикладных задачах, как правило, значение сдвига окна неизвестно, в лучшем случае оно находится в некоторых пределах. Очевидно, что число возможных реконструкций при заданном наборе фрагментов зависит от предполагаемой величины сдвига: оно растет с увеличением сдвига, достигая факториального максимума при от-

сутствии перекрытий подслов (когда сдвиг равен ширине окна).

Очевидный интерес представляет исследование зависимости числа возможных реконструкций от сдвига. В содержательном аспекте практических постановок задач чрезмерно большое число возможных реконструкций, представляемых группе экспертов для принятия решения, приводит к резкому росту трудоемкости и времени принятия окончательного решения. В связи с этим экспертная группа заинтересована в получении ограниченного числа реконструкций, которые можно будет проанализировать за приемлемое время. Один из возможных путей сокращения предъявляемого числа реконструкций заключается во введении дополнительных ограничений, обусловленных характером прикладной задачи. В терминах комбинаторики слов такие ограничения приводят к задаче реконструкции с запретами, для которой авторами также предложено решение [15] в гипотезе единичного сдвига.

В настоящей статье задача реконструкции слов при произвольном параметре сдвига рассматривается в целях оценки зависимости числа возможных реконструкций от величины сдвига при отсутствии запретов.

## 1. Терминология и обозначения

Введем следующие обозначения:

$\Sigma = \{a, b\}$  — бинарный алфавит,  $s$  — произвольный символ алфавита;

$w$  — слово (над алфавитом  $\Sigma$ ) — последовательность символов алфавита;

$|w|$  — длина слова (число символов в слове);

$SW(w, i, l)$  — оператор выделения подслова длины  $l$  в слове  $w$  начиная с символа в позиции  $i$ . Пусть  $|w| = r$ , тогда оператор определен при  $i + l - 1 \leq r$ :

$$SW(s_1 s_2 \dots s_r, i, l) = v = s_i s_{i+1} \dots s_{i+l-1};$$

$SH(w, l, k)$  — оператор сдвига с параметром  $k$ , действующий на слово  $w$  окном ширины  $l$  и порождающий мультимножество подслов длины  $l$  с мощностью  $\lfloor (|w| - l + k) / k \rfloor$ . Определенный при  $|w| \geq l$  оператор  $SH(w, l, k)$  выполняет позиционирование окна ширины  $l$  последовательно, начиная с крайней левой позиции слова  $w$ , сдвигая каждый раз окно на  $k$  символов вправо по данному слову. В каждой позиции окна фиксируется подслово длины  $l$ :

$$SH(w, l, k) = \{v_i | v_i = SW(w, i, l), i = 1, \lfloor (|w| - l + k) / k \rfloor, \Delta i = k\},$$

где подслова  $v_i$  могут, очевидно, породить мультимножество.

Например, для алфавита  $\Sigma = \{a, b\}$  и слова  $w = "bbababa"$ ,  $|w| = 7$ , при окне ширины 4 с параметром сдвига  $k = 1$  имеем:  $SH(bbababa, 4, 1) = \{bbab, baba, abab, baba\}$ , а при параметре сдвига  $k = 2$  получаем  $SH(bbababa, 4, 2) = \{bbab, abab\}$ , поскольку  $\lfloor (|w| - 4 + 2)/2 \rfloor = 2$ .

## 2. Постановка задачи

В целях формулировки задачи обозначим далее:  $V = \{v_i \mid v_i, i = 1, n\}$  — исходное мультимножество подслов;  $n$  — число подслов во множестве  $V$ ;  $l$  — длина подслова;  $k$  — параметр сдвига в операторе  $SH(w, l, k)$ , причем  $1 \leq k \leq l$ .

*Объектом исследования* в данной статье является мультимножество  $V$  подслов мощности  $n$  над бинарным алфавитом  $\Sigma = \{a, b\}$ . Слова в мультимножестве  $V$  имеют фиксированную длину  $l$ . Относительно мультимножества  $V$  мы принимаем гипотезу о том, что оно порождено оператором сдвига  $SH(w, l, k)$  по неизвестным словам  $w$ . Последовательно принимаются гипотезы о фиксированном значении параметра сдвига  $k$  в операторе  $SH(w, l, k)$  в диапазоне  $1 \leq k \leq l$ .

На основе мультимножества  $V$  возможно построение множества реконструируемых слов  $W$  при фиксированном параметре  $k$ . Полное решение задачи о реконструкции подробно описано в работе [14]. Очевидно, что возможное число реконструкций  $|W|$  зависит как от параметров задачи ( $n, l$  и  $k$ ), так и от собственно подслов в мультимножестве  $V$ . В предположении о том, что подслова в  $V$  порождены псевдослучайным равномерным генератором, введем в рассмотрение случайную величину  $X(V, n, l, k) = |W|$  — число порождаемых реконструкций. Тем самым случайная величина  $X(V, n, l, k)$  определена на вероятностном пространстве мультимножеств  $V$  мощности  $n$ , содержащих подслова длины  $l$  в гипотезе сдвига  $k$ . Обозначим  $N(n, l, k)$  оценку математического ожидания этой случайной величины —  $N(n, l, k) = \hat{E}(X(n, l, k))$ .

*Предмет исследования* — оценка математического ожидания числа реконструкций в зависимости от параметра  $k$  оператора сдвига  $SH(w, l, k)$  при фиксированных значениях  $n$  и  $l$  на мультимножествах  $V$ , содержащих подслова бинарного алфавита в гипотезе равномерного распределения символов.

### Содержательная постановка задачи

*Постановка:* для мультимножеств слов фиксированной длины в бинарном алфавите оценить математическое ожидание числа возможных реконструкций с ростом параметра  $k$  оператора  $SH(w, l, k)$  при фиксированных значениях  $n$  и  $l$ . По сути, мы принимаем гипотезу о том, что по-

рожденные псевдослучайным равномерным генератором подслова в мультимножествах  $V$  представляют собой результат воздействия оператора  $SH(w, l, k)$  на какие-то неизвестные слова  $w$ .

### Формальная постановка задачи

*Дано:* мультимножество  $V$  подслов в бинарном алфавите мощности  $n$ , все слова в котором имеют одинаковую длину  $l$  и получены псевдослучайным равномерным генератором; диапазон параметра сдвига  $k$  в операторе  $SH(w, l, k) — 1 \leq k \leq l$ .

*Постановка:* получить оценку математического ожидания числа реконструкций  $N(n, l, k) = \hat{E}(X(n, l, k))$  в зависимости от параметра сдвига  $k$ , где случайная величина  $X(V, n, l, k) = |W|$  есть число реконструкций, определяемое мультимножеством  $V$  при заданных параметрах  $n, l$  и  $k$ . Мы рассматриваем оценку  $N(n, l, k)$  на множестве, элементами которого являются случайные мультимножества  $V$  при заданных параметрах  $n, l$ .

## 3. Оценка математического ожидания числа реконструкций

Введем в рассмотрение дополнительное обозначение  $m = l - k$ . Содержательно значение  $m$  есть длина перекрытия двух подслов при возможной реконструкции для порождающего окна со сдвигом  $k$ . Перед изложением предлагаемой оценки отметим следующее:

- авторы не рассматривают далее тривиальные и вырожденные случаи поставленной задачи (например, случай  $k = 0$  и т.д.);
- поскольку дальнейший анализ выполняется аппаратом теории вероятностей, то получаемые значения  $N(n, l, k)$  не обязательно являются целыми, хотя в реальности одного испытания (реконструкции слов по множеству  $V$ ) число возможных реконструкций есть или целое положительное число, или ноль;
- возможное отсутствие реконструкций в терминах оценки математического ожидания означает близкие к нулю значения  $N(n, l, k)$ ;
- при изменении параметра сдвига в операторе  $SH(w, l, k)$  с фиксированными значениями  $n$  и  $l$  увеличивается длина  $L$  возможных реконструируемых слов, поскольку  $L = l + (n - 1)k$ ;
- как известно [16], математическое ожидание произведения двух независимых случайных величин  $X, Y$  равно произведению их математических ожиданий  $E(XY) = E(X)E(Y)$ , но в предлагаемом ниже решении требование независимости может нарушаться, что и приводит авторов к формулировке результата как оценки математического ожидания.

Если параметр  $k$  оператора  $SH(w, l, k)$  равен длине слова, то мы получаем подслова без перекрытия, и, очевидно, возможными являются любые реконструкции, порожденные всеми перестановками подслов в  $V$  независимо от мощности алфавита. Тем самым, при  $k = l$  мы получаем точное решение задачи:  $N(n, l, l) = n!$ . Далее мы рассматриваем изменение параметра сдвига в пределах  $1 \leq k \leq l - 1$ .

Будем считать процесс реконструкции последовательным, т.е. на очередном шаге к уже построенной части реконструируемого слова присоединяется, если это возможно, еще одно подслово из  $V$ , которое изымается из этого множества. Поскольку задача реконструкции ставится на всем мультимножестве  $V$ , то полное число шагов последовательной реконструкции равно мощности  $V$ , т.е.  $n$ . Идея построения оценки состоит в том, чтобы оценить число возможных присоединений на текущем шаге и, опираясь на свойство математического ожидания произведения, получить требуемую оценку перемножением полученных оценок на всех шагах. Поскольку на каждом шаге присоединенное подслово изымается из  $V$ , мы не можем гарантировать независимость случайных величин, что особенно заметно на последних шагах. Это приводит к формулировке результата как оценки математического ожидания.

Рассмотрим вначале случай, когда  $k = l - 1$ , т.е. окно оператора  $SH(w, l, l - 1)$  при сдвиге перекрывает только один последний символ предыдущего подслова. При этом  $m = 1$ . Поскольку процесс реконструкции последовательный, то на очередном шаге к уже построенной части слова присоединяется еще одно подслово из  $V$ , и процесс повторяется  $n$  раз до исчерпания множества  $V$ . Проведем следующее рассуждение, связанное с возможными вариантами последовательной реконструкции, оценивая последовательно математическое ожидание на каждом шаге:

- на шаге 1 в качестве начального подслова из  $V$  может быть взято любое подслово, и мы фиксируем  $n$  возможных вариантов;
- на шаге 2 в  $V$  осталось  $n - 1$  подслово. Поскольку мы рассматриваем бинарный алфавит, и порождение подслов в  $V$  происходит псевдослучайным равномерным генератором, то уже выбранное слово равновероятно оканчивается на один из двух символов алфавита, а в оставшейся части  $V$  подслова равновероятно имеют один из символов алфавита в качестве начального символа. Получаем, что оценка математического ожидания на этом шаге есть половина оставшихся подслов —  $(n - 1)/2$ ;
- на шаге  $j$  в  $V$  осталось уже  $n - j + 1$  подслов, и рассуждения, аналогичные приведенному выше, показывают, что оценка математического ожидания на шаге  $j$  есть  $(n - j)/2$ ;

- на последнем  $n$ -м шаге в  $V$  осталось одно подслово, которое равновероятно либо присоединяется к уже построенной реконструкции либо первый символ этого подслова не совпадает с последним символом текущей реконструкции, это дает значение оценки  $1/2$ .

Поскольку оценка математического ожидания числа возможных реконструкций равна произведению оценок математических ожиданий на шагах, мы получаем

$$N(n, l, l - 1) = \frac{n!}{2^{(n-1)}}. \quad (1)$$

Рассмотрим далее случай, когда  $k = l - 2$ , т.е. окно оператора  $SH(w, l, l - 2)$  при сдвиге перекрывает два последних символа предыдущего подслова, длина перекрытия  $m = 2$ . Рассуждения аналогичны предыдущему, за исключением того, что на каждом шаге оценка математического ожидания числа претендентов на добавление к реконструкции равно четверти от текущей мощности множества подслов. Это очевидно, поскольку при фиксации двух символов в конце текущей реконструкции и в оставшейся части  $V$  нужное начало в подсловах встречается с вероятностью  $1/4$ . В результате мы получаем (при  $m = 2$ )

$$N(n, l, l - 2) = \frac{n!}{4^{(n-1)}} = \frac{n!}{2^{2(n-1)}}. \quad (2)$$

Аналогичные рассуждения при произвольном допустимом ( $1 \leq k \leq l - 1$ ) значении сдвига показывают, что в степень двойки в знаменателе формулы (2) входит длина перекрытия и число подслов —  $m(n - 1)$ , но поскольку  $m = l - k$ , то мы, опираясь на соотношения (1) и (2), окончательно получаем

$$N(n, l, k) = \frac{n!}{2^{m(n-1)}} = \frac{n!}{2^{(l-k)(n-1)}}. \quad (3)$$

Простые преобразования, связанные с получением зависимости роста числа реконструкций от параметра сдвига при фиксированном числе подслов и их длине, приводят к результату

$$N(n, l, k) = \frac{n!}{2^{l(n-1)}} 2^{k(n-1)}. \quad (4)$$

Таким образом, с увеличением параметра сдвига число реконструкций растет экспоненциально с основанием  $2^{(n-1)}$ . Проверим случай, когда параметр сдвига равен длине подслова  $k = l$ . Подставляя  $k = l$  в выражение (3), получаем

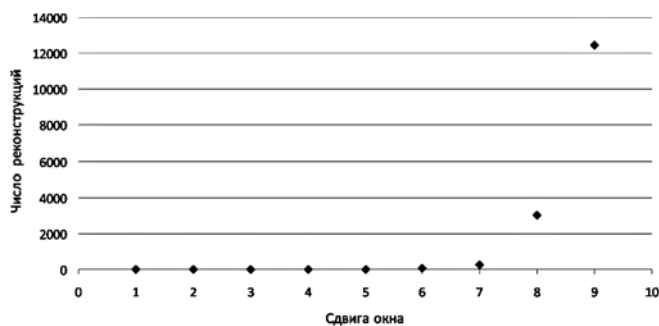
$$N(n, l, l) = \frac{n!}{2^{(l-l)(n-1)}} = \frac{n!}{2^0} = n!,$$

что согласуется с ранее полученным точным решением.

#### 4. Экспериментальные результаты

Для проведения экспериментального исследования была разработана программа на языке Java, реализующая методику получения полного числа реконструкций, основанная на статье [14] (программа и экспериментальное исследование выполнено А. С. Пестовой). Отметим, что такое исследование достаточно трудоемко, поскольку результат символьного умножения матрицы смежности мультиорграфа де Брейна хранит в виде символьного описания кортежей все эйлеровы пути в данном мультиорграфе [14]. Очевидно, что экспоненциальный рост числа реконструкций приводит к такой же сложности в программной реализации и соответствующим временным затратам. В связи с этим эксперименты проводились при числе подслов  $n = 10$  и длине подслова  $l = 10$  с изменением сдвига от 1 до 10. Результаты представлены в таблице и на рисунке.

Результаты подтверждают экспоненциальный рост числа реконструкций, но расходятся численно с оценкой (4). Такое расхождение, по мнению авторов, связано с тем, что оценка математического ожидания числа реконструкций правомерна при больших значениях  $n$ , когда предположение о равной частотной встречаемости символов бинарного алфавита согласуется с исходными данными. При длине подслов в 10 символов и числе подслов в нашем исследовании 10 такое предположение вносит погрешность в оценку, поскольку для биномиального распределения при  $n = 10$  вероятность того, что в последовательности из десяти символов встречается пять символов "а", равна 0,246, четыре символа "а" — 0,205, три символа "а" — 0,117. Такие неравномерности распределения частотной встречаемости символов приводят к сокращению числа возможных реконструкций.



Экспериментальные результаты реконструкции — значения  $N(10, 10, k)$

Экспериментальное число реконструкций при  $n = 10, l = 10$

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N(10, 10, k)$	0	0	1	2	10	63	240	3040	12474	3628800

#### Заключение

В статье получена оценка математического ожидания числа возможных реконструкций по исходному мультимножеству подслов в бинарном алфавите в зависимости от параметра сдвига порождающего окна при отсутствии запретов.

Полученные оценки дают возможность оценить связь между "плотностью" наличествующей фрагментарной информации и числом альтернативных решений. Они полезны с точки зрения возможности определения числа альтернатив до начала реконструкции, что может оказаться важным в задачах принятия решений на основе восстановленной полной информации.

Возможные дальнейшие исследования связаны с анализом влияния дополнительной информации в виде запретов некоторых вариантов реконструкции на число возможных реконструкций.

#### Список литературы

1. Lind D., Marcus B. An Introduction to Symbolic Dynamics and Coding. New York: Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995. 495 pp.
2. Lothaire M. Algebraic Combinatorics on Words. Cambridge University Press, 2002. 455 с. URL: <http://www-igm.univ-mlv.fr/~berstel/Lothaire/>.
3. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Связь, 1979. 744 с.
4. Левенштейн В. И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // Докл. АН СССР. 1965. Т. 163, № 4. С. 707—710.
5. Левенштейн В. И. Восстановление объектов по минимальному числу искаженных образцов // Докл. РАН. 1997. Т. 354, № 5. С. 593—596.
6. Зенкин А. И., Леонтьев В. К. Об одной неклассической задаче распознавания // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 1984. Т. 24, № 6. С. 925—931.
7. Леонтьев В. К. Распознавание двоичных слов по их фрагментам // Докл. РАН. 1993. Т. 330. № 4. С. 434—436.
8. Apostolico A., Atallah M. J. Compact Recognizers of Episode Sequences // Information and Computation. 2002. Vol. 174. С. 180—192.
9. Wang J. T. L., Ma Q., Shasha D., Wu C. H. New Techniques for Extracting Features from Protein Sequences // IBM Systems Journal. 2001. Vol. 40, N. 2. P. 426—441.
10. Гасфилд Д. Строки, деревья и последовательности в алгоритмах: Информатика и вычислительная биология / Пер. с англ. И. В. Романовского. СПб.: Невский Диалект, 2003. 654 с.
11. Kortelainen J. On the System of Word Equations in a Free Monoid // Journal of Automata, Languages and Combinatorics. 1998. Vol. 3, N. 1. P. 43—57.
12. Андерсен Бьерн. Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования / Пер. с англ. С. В. Ариничева. М.: РИА "Стандарты и качество", 2003. 272 с.
13. Евдокимов А. А., Левин А. А. Инструментарий графического исследования символьных последовательностей // Прикладная дискретная математика. 2008. Вып. 1 (Прикладная теория графов).
14. Smetanin Yu. G., Ulyanov M. V. Reconstruction of a Word from a Finite Set of its Subwords under the unit Shift Hypothesis. I. Reconstruction without for Bidden Words // Cybernetics and Systems Analysis. January 2014. Vol. 50, Iss. 1. P. 148—156.
15. Smetanin Yu. G., Ulyanov M. V. Reconstruction of a Word from a Finite Set of its Subwords under the unit Shift Hypothesis. II. Reconstruction with Forbidden Words // Cybernetics and Systems Analysis. January 2015. Vol. 51, Iss. 1. P. 157—164.
16. Ширяев А. Н. Вероятность. М.: МЦНМО, 2007. 968 с.

**Yu. G. Smetanin**, D. Sc., Chief Researcher, e-mail: ysmetanin@rambler.ru,  
Federal Research Center "Informatics and Control", Moscow, Russia,  
**M. V. Uljanov**, Ph. D., Leading Researcher, e-mail: muljanov@mail.ru,  
Institute of Control Sciences, Moscow, Russia,  
**A. S. Pestova**, Graduate Student,  
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

## On the Number of Possible Reconstructions of Words Using Subwords with Windows of Different Shift

*The objects studied in the article are finite words over binary alphabet. These words are symbolic codes of the objects and processes under study. Under the assumption that only fragments (subwords) of such descriptions are known to the researcher, the problem of reconstructing the complete code is of interest. From the point of view of combinatorics of words, reconstructing the description using disjointed fragments of observations is the task of reconstructing a word using known subwords. To solve it, one needs to accept the hypothesis about the value of the sliding window that generates the subwords. Obviously, such a reconstruction can be multivalued. The dependence of the mathematical expectation for the number of possible reconstructions on the value of the shift parameter is proposed in the article. The obtained estimates make can be used for evaluating the relationship between the "density" of the available fragmentary information and the number of alternative solutions of the reconstruction problem. They are useful from the point of the possibility of determining the number of alternatives before the beginning of the reconstruction process. The estimations may prove to be important in decision-making problems which demand the restored complete information. Possible further studies are related to the analysis of the effect of additional information, presented in the form of prohibitions of certain reconstruction options, on the number of possible reconstructions.*

**Keywords:** words over a finite alphabet, sliding window of arbitrary shift, reconstruction of words, estimation of the number of reconstructions

### References

1. **Lind D., Marcus B.** An Introduction to Symbolic Dynamics and Coding, New York, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995, 495 p.
2. **Lothaire M.** Algebraic Combinatorics on Words, Cambridge University Press, 2002, 455 p. <http://www-igm.univ-mlv.fr/~berstel/Lothaire/>.
3. **McWilliams F. J. and Sloan N. J. A.** The Theory of Error Correcting Codes, North Holland, 1977.
4. **Levenshtein V. I.** *Dvoichnye kody s ispravleniem vypadenii, vstavok i zameshchenii simvolov* (Binary codes correcting insertions, deletions and substitutions), *Dokl. AN SSSR*, 1965, vol. 163, no. 4, pp. 707–710 (in Russian).
5. **Levenshtein V. I.** *Vosstanovlenie ob'ektov po minimal'nomu chislu iskazhennykh obraztsov* (Reconstruction of objects using the minimal number of corrupted samples), *Dokl. AN SSSR*, 1974, vol. 354, no. 5, pp. 593–595 (in Russian).
6. **Zenkin A. I., Leont'ev V. K.** *Ob odnoi neklassicheskoi zadache raspoznavaniia* (On a non-classic recognition problem), *Zhurn. Vychisl. Matematiki i Matem. Fiziki*, 1984, vol. 24, no. 6, pp. 925–931 (in Russian).
7. **Leont'ev V. K.** *Raspoznavanie dvoichnykh slov po ikh fragmentam* (Binary words recognition using their fragments), *Dokl. RAN*, vol. 330, no. 4, pp. 434–436 (in Russian).
8. **Apostolico A., Atallah M. J.** Compact Recognizers of Episode Sequences, *Information and Computation*, 2002, vol. 174, pp. 180–192.
9. **Wang J. T. L., Ma Q., Shasha D., Wu C. H.** New Techniques for Extracting Features from Protein Sequences, *IBM Systems Journal*, 2001, vol. 40, no. 2, pp. 426–441.
10. **Gasfield D.** Lines, Trees and Sequences in Algorithms, Informatics and Computational Biology, Petersburg, Nevsky Dialect, 2003, 654 p. (in Russian).
11. **Kortelainen J.** On the System of Word Equations in a Free Monoid, *Journal of Automata, Languages and Combinatorics*, 1998, vol. 3, no. 1, pp. 43–57.
12. **Andersen B.** Business Process Improvement Toolbox, ASQ Quality Press, 2003, 296 p.
13. **Evdokimov A. A., Levin A. A.** *Instrumentarii graficheskogo issledovaniia simvol'nykh posledovatel'nostei* (A tool for graphical exploration of character sequences), in: Evdokimov A. A., Levin A. A.: *Novosibirsk: Prikladnaia diskretnaia matematika* (Applied discrete mathematics), 2008, no. 1, *Prikladnaia teoriia grafov* (Applied graph theory) (in Russian).
14. **Smetanin Yu. G., Ulyanov M. V.** Reconstruction of a Word from a Finite Set of its Subwords Under the Unit Shift Hypothesis. I. Reconstruction with Forbidden Words, *Cybernetics and Systems Analysis*, January, 2014, vol. 51, issue 1, pp. 168–177.
15. **Smetanin Yu. G., Ulyanov M. V.** Reconstruction of a Word from a Finite Set of its Subwords Under the Unit Shift Hypothesis. II. Reconstruction with Forbidden Words, *Cybernetics and Systems Analysis*, January, 2015, Volume 51, Issue 1, pp. 157–164.
16. **Shiryayev A. N.** *Veroyatnost'* (Probability), Moscow, MCNMO, 2007, 968 p.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 004.896

DOI: 10.17587/it.24.239-244

**В. В. Курейчик**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, e-mail: vkur@sfedu.ru,  
**М. А. Жиленков**, аспирант, e-mail: MZhilenkov777@gmail.com,  
**Вл. Вл. Курейчик**, аспирант, e-mail: kureichik@yandex.ru,  
Южный федеральный университет

## Генетический алгоритм решения задачи компоновки с учетом электромагнитной совместимости<sup>1</sup>

*Предлагается решение одной из важных задач конструкторского проектирования — задачи компоновки с учетом критерия электромагнитной совместимости элементов. Приводится постановка задачи и ее математическая модель. Разработан модифицированный генетический алгоритм решения задачи компоновки. В качестве модификации генетического алгоритма предлагаются модифицированные генетические операторы. Для решения проблемы предварительной сходимости алгоритма разработаны процедуры глобального и локального улучшения. Проведен вычислительный эксперимент для определения эффективности предложенного подхода. Серия проведенных экспериментов показывает преимущество разработанного генетического алгоритма.*

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, компоновка, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, мутация, кроссинговер

### Введение

Процесс конструкторского проектирования цифровых электронных средств характеризуется большой размерностью решаемых задач ( $n > 1000$  элементов на плате размером 5,5×5,8 дюйма), наличием большого числа потенциальных решений, а также необходимостью учета различных критериев. Важную роль при проектировании современных печатных плат (ПП) приобретает учет критерия электромагнитной совместимости (ЭМС), что обусловлено стремлением к повышению быстродействия и снижению габаритных размеров цифровых электронных средств [1–6]. В связи с этим необходимо совершенствование математического и программного обеспечения систем автоматизированного проектирования печатных плат цифровых электронных средств. Одним из возможных подходов к решению этой проблемы является использование новых технологий на стыке информатики, бионики и автоматизации проектирования. Поэтому разработка

новых биоинспирированных принципов и подходов к принятию эффективных решений в задачах конструкторского проектирования имеет важное экономико-социальное значение и является в настоящее время актуальной и важной задачей [7–12]. Цель данной работы — разработка и исследование эффективности предлагаемого модифицированного генетического алгоритма для решения задачи компоновки.

### 1. Постановка задачи и математическая модель компоновки с учетом критерия ЭМС

При решении задачи компоновки необходимо учитывать как конструктивные (геометрические), так и функциональные особенности элементов [2, 11, 13–15].

На рис. 1 рассматривается пример функционального вхождения элементов ПП в виде дерева решений  $T(V, R)$ .

Здесь  $i \in I$  — текущий уровень дерева, где  $I = \{1, q\}$ ,  $q$  — число уровней дерева;  $j \in J_i$  — номер подсхемы  $i$ -го уровня, где  $J_i = \{1, n_i\}$ ,  $n_i$  — число подсхем  $i$ -го уровня;  $V_i = \{v_{ij} | j \in J_i\}$  — множество вершин  $i$ -го уровня, сопоставленных с подсхемами этого уровня функциональной иерархии.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ЮФУ по теме № 2.6432.2017/БЧ и гранта РФФИ № 18-01-00041.

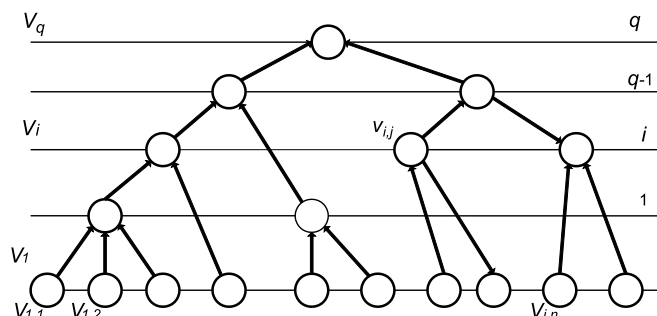


Рис. 1. Вид дерева графа функционального вхождения элементов

Необходимо, чтобы множество вершин дерева  $V = \{V_i | i \in I\}$ , а также подмножества вершин каждого уровня  $V_i$  удовлетворяли условиям:

$$(\forall i \in I, \forall j, k \in J_i) v_{ij} \cap v_{i,k} = \emptyset \& j \neq k; \quad (1)$$

$$(\forall i \in I', \forall j \in J_i) R(v_{ij}) = \{V'_{i-1}, V'_{i-2}, \dots, V'_1\}, \quad (2)$$

где  $V'_{i-1} \subset V_{i-1}, V'_{i-2} \subset V_{i-2}, \dots, V'_1 \subset V_1$ ,  $I' = \{2, q\}$ ,  $R(v_{ij})$  — родительская вершина вершины  $v_{ij}$ , причем  $V_{i-k}$  может быть пустым множеством, когда  $i = k = 1$ .

Приведем формальное описание структуры ПП на основе ее конструкции:

$$(\forall i \in I, \forall j \in J_i) M_{i-1}^{i,j} \subset M_{i-1}; \quad (3)$$

$$(\forall i \in I, \forall j, k \in J_i) M_{i-1}^{i,j} \cap M_{i-1}^{i,k} = \emptyset \& j \neq k; \quad (4)$$

$$(\forall i \in I) \bigcup_{j \in J_i} M_{i-1}^{i,j} = M_{i-1}. \quad (5)$$

Здесь  $M = \{M_i | i \in I\}$  — полное набор конструктивных узлов;  $M_i = \{M_{ij} | j \in J_i\}$ ,  $I = \{1, m\}$ ,  $J_i = \{1, n\}$ ,  $M_{i-1}^{i,j} \subset M_{i-1}$  — подмножество конструктивных узлов  $(i-1)$ -го уровня, входящих в  $j$ -й модуль  $i$ -го ранга;  $m$  — число уровней иерархии конструктивных модулей;  $n_i$  — число модулей  $i$ -го уровня.

Сравнение математического описания дерева функциональных записей и конструкторской структуры ПП приводит к формальной постановке задачи компоновки: найти такое отображение множества  $V$  функционально законченных схем в множество  $M$  конструктивных модулей, при котором удовлетворяются условия (1)–(5) [4].

В данной работе задача компоновки рассматривается как разбиение принципиальной электрической схемы соединения компонентов первого уровня конструктивной иерархии на части для определения схемного состава ПП, составляющих второй уровень конструктивной иерархии модулей цифровых ПП, с учетом определенных критериев и ограничений. В связи с этим представим задачу компоновки как разбиение гипер-

графа  $H(X, U)$  на части  $H_l(X_l, U_l)$ , где вершины графа — компоненты ПП, ребра — межсоединения. Задача разбиения состоит в декомпозиции гиперграфа  $H(X, U)$  на совокупность  $B(H)$  модулей  $H_l(X_l, U_l)$ ,  $l = \overline{1, L}$ , где  $L$  — требуемое число частей структуры. Полученный в результате декомпозиции набор модулей обладает следующими свойствами [5, 6]:

$$\forall H_l \in B(H) \quad H_l \neq \emptyset; \quad l \in L;$$

$$\forall H_l, H_p \in B(H) \quad X_l \cap X_p = \emptyset \& U_l \cap$$

$$\cap U_p = U_{l,p}; \quad l, p \in L;$$

$$\bigcup_{l \in L} H_l = H,$$

где  $U_{l,p}$  — множество ребер в разрезе между кусками  $H_l$  и  $H_p$ .

Тогда целевая функция задачи компоновки примет следующий вид:

$$ЦФ = 1 / \sum_{l,p=1}^L |U_{l,p}|, \quad ЦФ \rightarrow \max,$$

где  $|U_{l,p}|$  — мощность множества  $U_{l,p}$ .

Ограничения задачи вводятся в форме неравенств или равенств и могут накладываться на следующие проектные параметры: площадь монтажного пространства ПП; число компонентов, размещаемых на одной ПП; число внешних выводов ПП; число компокуемых ПП.

## 2. Модифицированный генетический алгоритм решения задачи компоновки с учетом критерия ЭМС

Для решения поставленной задачи предлагается модифицированный генетический алгоритм, структурная схема которого представлена на рис. 2 [13–18].

Опишем работу блоков представленной структурной схемы более подробно. На первом шаге анализируются поступившие данные решаемой задачи, а также выполняется кодирование альтернативных решений (хромосом) [13, 17, 19]. Далее создается начальная популяция  $P$ , и для каждой хромосомы в популяции вычисляются максимальные, минимальные и средние значения ЦФ задачи компоновки. Определяем  $K_1$  как среднее значение ЦФ ( $ЦФ_{cp}$ ) всей популяции альтернативных решений. В одной итерации алгоритма это значение будет константой. Далее все альтернативные решения, имеющие значения ЦФ большие, чем значение  $ЦФ_{cp}$ , переносятся в подпопуляцию  $P_1$ . На следующем шаге случайно генерируем  $P_2$  исходя из  $P_1$ . Комплектуем популяцию  $P$  из суммы  $P_1$  и  $P_2$ . Затем проверяем условие оста-



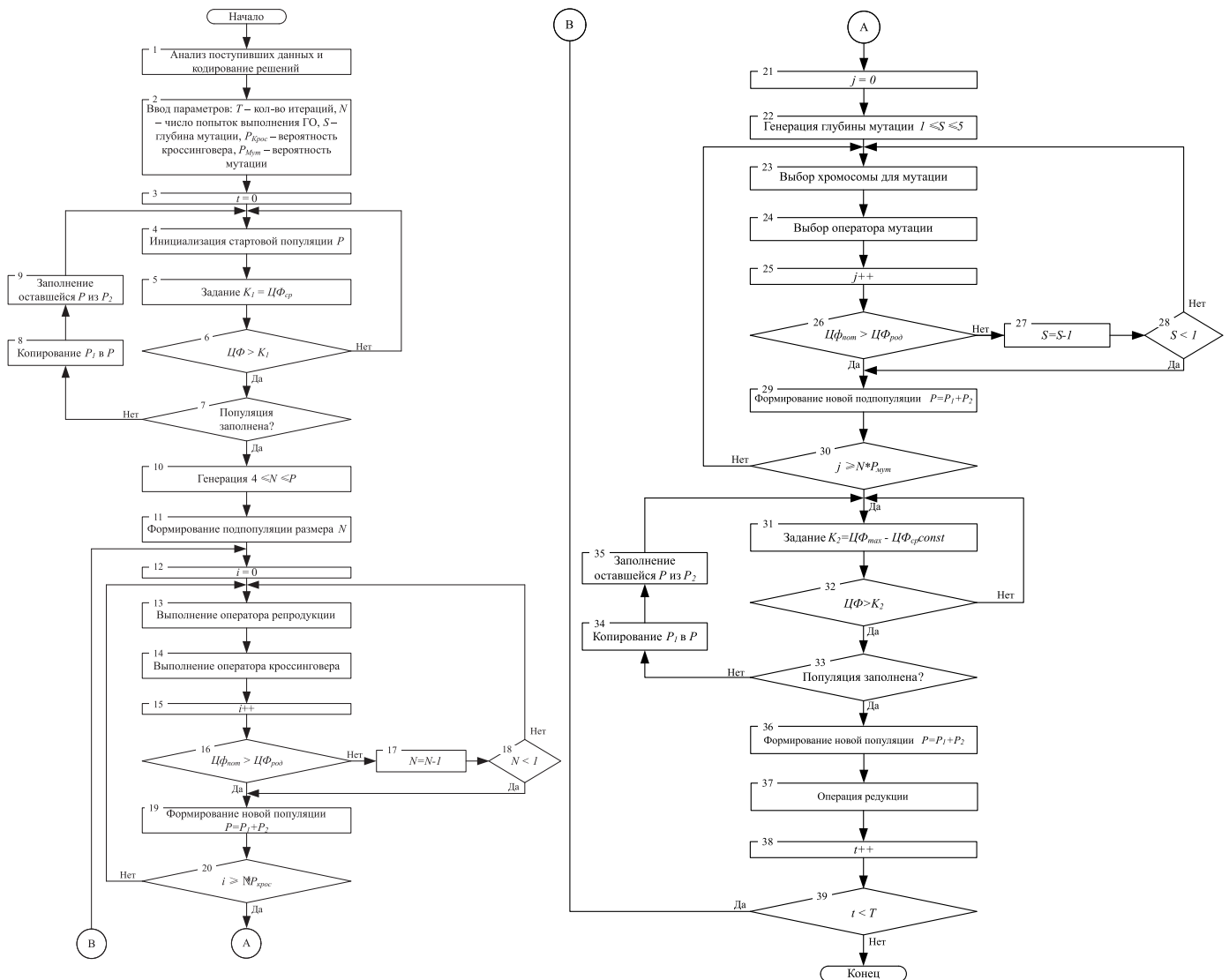


Рис. 2. Схема работы модифицированного генетического алгоритма

нова: если оно выполняется, то следует переход к пункту 10, если нет — к пункту 4. Далее задаем  $N$  как параметр мощности стартовой популяции, а также используем мощность  $N$  для построения  $P_1$  как подпопуляции. Затем для создания хромосом-потомков проводится реализация модифицированных генетических операторов. Устанавливаем фильтр, отсекающий хромосомы-потомки со значением ЦФ, меньшим, чем у родительских хромосом. Проверяем данное условие: если выполнено, то комплектуем популяцию  $P$  из суммы  $P_1$  и  $P_2$ , если нет, то  $N$  присваиваем значение  $N - 1$  и возвращаемся к пункту 13. Снова проверяем условия останова, при их выполнении осуществляется переход к пункту 21, если условия останова не выполнены, возвращаемся к пункту 13, повторяя процедуру. На следующем шаге выполняется процедура "глубина мутации", где  $S$  находится в пределах от 1 до 5. После этого создаем  $P_1$  как подпопуляцию и применяем модифицированный

оператор мутации. После выполнения оператора мутации получаем новые хромосомы-потомки и проверяем условие, чтобы значение ЦФ потомков было больше, чем значение ЦФ родительских хромосом. При его выполнении комплектуем популяцию  $P$  из суммы  $P_1$  и  $P_2$ , но в случае его невыполнения возвращаемся к пункту 23. Далее следует проверка условия останова: если условие верно, то следует пункт 31, если нет — пункт 23. На следующем шаге вычисляем коэффициент  $K_2$  по формуле:  $K_2 = \text{ЦФ}_{\max} - \text{ЦФ}_{\text{кр}}$ , где  $\text{ЦФ}_{\max}$  — максимальное значение целевой функции отдельного альтернативного решения (хромосомы) задачи компоновки, причем  $K_2 > K_1$ . Затем, исходя из полученного значения  $K_2$  и сравнивая его со значением  $\text{ЦФ}_1$ , отбираем решения в подпопуляцию  $P_1$ . Далее комплектуем популяцию  $P$  из суммы  $P_1$  и  $P_2$  и реализуем оператор редукции. На следующем шаге происходит инкрементирование регистратора числа итераций алгоритма и финальная про-

верка заданного условия останова. В случае если условие останова выполнено, то конец работы алгоритма, нет — возврат к пункту 12.

В качестве модификации разработанного генетического алгоритма предлагаются модифицированные операторы кроссинговера, мутации, а также процедура локального и глобального улучшения [13, 17, 18]. Процедура локального улучшения состоит в следующем. Альтернативные решения-потомки, прошедшие этапы кроссинговера и рекомбинации и имеющие более высокие результаты значений целевой функции  $F$ , подвергаются мутации в цикле из  $S$  попыток. Процедура мутации выполняется не менее  $S - 1$  числа попыток. Тем самым параметр  $S$  на данном этапе алгоритма исполняет функцию глубины мутации, которая задается динамически на интервале  $1 \leq S \leq 5$ . Лучшие альтернативные решения формируют новое поколение в виде набора  $P$ .

Для отбора решений в следующие популяции используется процедура глобального улучшения за счет введения элитных и случайных альтернативных решений. В первом случае это позволяет быстрее получать наборы оптимальных и квазиоптимальных решений задачи компоновки, а во втором случае — разнообразить популяцию решений и решить проблему преждевременной сходимости. Для сохранения заданного размера популяции в работе применяется оператор отбора [13]. Условием окончания работы алгоритма является заданное число итераций.

### 3. Вычислительный эксперимент

На основе предложенного алгоритма была разработана прикладная программа в среде *Microsoft Visual Studio 2017 Express* с применением языка *C++*. При проведении экспериментальных исследований с использованием ряда тестовых примеров оценивалась зависимость параметров эффективности разработанного генетического алгоритма от начальных значений введенных данных [20]. При проведении исследований учитывалось время работы программы и значения аддитивной целевой функции лучшего решения. Значения параметров эффективности программы, реализующей генетический алгоритм решения задачи компоновки в зависимости от размерности исходных данных, представлены в таблице.

В ходе вычислительного эксперимента была проведена оценка работы эффективности разработанного модифицированного генетического алгоритма в сравнении с эволюционным и роевым алгоритмами компоновки. На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) представлен результат сравнения в виде гистограммы.

Результаты работы алгоритма

№	Число элементов	Параметры эффективности алгоритма компоновки	
		Время работы программы, с	$F$
1	500	8	39919,9
2	650	8	40122,7
3	800	9	40811,1
4	950	9	213690
5	1100	10	213048
6	1250	10	213640
7	1400	11	558988
8	1500	11	554339

Как видно из представленной гистограммы, использование модифицированного генетического алгоритма дает заметно лучший результат в среднем на 15 % по значению целевой функции, чем другие тестируемые алгоритмы.

Серия проведенных экспериментов показывает, что временная сложность алгоритма находится в пределах  $O(n \log n) - O(n^2)$  и линейно зависит от количества генераций.

### Заключение

Разработан модифицированный генетический алгоритм для решения задачи компоновки элементов печатной платы. При решении данной задачи основной уклон был сделан на обеспечение электромагнитной совместимости элементов, что и являлось главным критерием задачи. Отличительной особенностью данного подхода является разработанная процедура локального и глобального улучшения. Продемонстрированный метод решает вопрос предварительной сходимости генетического алгоритма и представляет множество как оптимальных, так и квазиоптимальных решений за полиномиальное время. Разработана программная среда на языке *C++*. Проведена серия тестов экспериментальных исследований, что позволило уточнить теоретические оценки временной сложности алгоритмов: в лучшем случае —  $O(n \log n)$ , в худшем случае —  $O(n^2)$ . Предлагаемый подход позволяет частично решить вопрос предварительной сходимости. Разработанный модифицированный генетический алгоритм компоновки дает возможность получать более эффективный результат в среднем на 15 % лучше, чем другие тестируемые алгоритмы.

### Список литературы

1. Alpert C. J., Dinesh P. M., Sachin S. S. Handbook of Algorithms for Physical design Automation. USA: Auer Bach Publications Taylor & Francis Group, 2009.

2. **Sherwani N. A.** Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Third Edition. USA: Kluwer Academic Publisher, 2013.
3. **Lim S. K.** Practical Problems in VLSI Physical Design Automation. Germany: Springer Science + Business Media B.V, 2008.
4. **Суздальцев И. В.** Методика решения задач проектирования печатных плат цифровых электронных средств с учетом критериев электромагнитной совместимости, с использованием эволюционных алгоритмов // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. 9-го Междунар. симп. СПб.: ЛЭТИ, 2011. С. 220–222.
5. **Чермошнев С. В.** Многокритериальная оптимизация электромагнитной совместимости межсоединений печатных плат цифровых электронных средств генетическими алгоритмами // Электромагнитная совместимость: Сб. докл. VII Рос.науч.-техн. конф. СПб. 2002. С. 298–300.
6. **Хьюбинг Т., Хьюбинг Н., Очур О.** Электромагнитная совместимость и разводка печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2017. № 93. С. 18–20.
7. **Родзин С. И., Курейчик В. В.** Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор) // Кибернетика и программирование. 2017. № 3. С. 51–79.
8. **Курейчик В. В., Бова В. В., Курейчик Вл. Вл.** Комбинированный поиск при проектировании // Образовательные ресурсы и технологии. 2014. № 2 (5). С. 90–94.
9. **Курейчик В. В., Курейчик Вл. Вл.** Биоинспирированный поиск при проектировании и управлении // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 11 (136). С. 178–183.
10. **Ficci S. G.** Solution Concepts in Coevolutionary Algorithms: A Doctor of Philosophy Diss. Brandeis University, 2004.
11. **Курейчик В. В., Курейчик Вл. Вл.** Биоинспирированный алгоритм разбиения схем при проектировании СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 7 (144). С. 23–29.
12. **Курейчик В. В., Заруба Д. В., Запорожец Д. Ю.** Биоинспирированный алгоритм компоновки блоков ЭВА на основе модифицированной раскраски графа // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 4 (165). С. 6–14.
13. **Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М.** Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2010. 368 с.
14. **Гладков Л. А., Гладкова Н. В., Гордиенко В. Н.** Модифицированный генетический алгоритм решения задачи компоновки блоков ЭВА // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2015. № 4 (24). С. 18–27.
15. **Курейчик В. М., Курейчик В. В.** Генетический алгоритм разбиения графа // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 1999. № 4. С. 79–87.
16. **Мухлаева И. В.** Компоновка на основе ГА // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. № 8 (43). С. 84–85.
17. **Курейчик В. В., Жиленков М. А.** Генетический алгоритм для решения оптимизационных задач с явно выраженной целевой функцией // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2014. № 4 (19). С. 1–8.
18. **Fonseca C. M., Fleming P. J.** Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Genetic Algorithms. San Mateo, California. 1993. P. 416–423.
19. **Kurejchik V. V., Kurejchik V. M.** ON GENETIC-BASED CONTROL // Автоматика и телемеханика. 2001. N. 10. С. 174–187.
20. **Kacprzyk J., Kureichik V. M., Malioukov S. P., Kureichik V. V., Malioukov A. S.** Experimental investigation of algorithms developed // Studies in Computational Intelligence. 212. 2009. P. 211–223, 227–236.

DOI: 10.17587/it.24.239-244

**V. V. Kureichik**, D. Sc., Professor, Head of Department, e-mail: vkur@sfedu.ru,  
**M. A. Zhilenkov**, Graduate Student, e-mail: MZhilenkov777@gmail.com,  
**VI. VI. Kureichik Jr.**, Graduate Student, e-mail: kureichik@yandex.ru,  
 South Federal University

## Genetic Algorithm or Partitioning Problem in View of Electromagnetic Compability

*The paper deals with one of the important design problems — a partitioning of elements on a printed circuit board (PCB). The authors provide a problem formulation with restriction and describe a mathematical model as a decision tree. As a main criterion was selected electromagnetic elements compability. The partitioning problem belongs to NP-hard class of combinatorial optimization problems, which is suggested to solve by modified genetic algorithm. As a modification of the genetic algorithm there are introduced modified genetic operators. To avoid a preliminary converges of the algorithm the authors apply procedures of global and local improvements. They are based on elite and random transformations in the modified genetic algorithm. It possible to obtain optimal and quazi-optimal problem solutions more quickly and to vary of an alternative solution population. To confirm the effectiveness the developed approach there are created a software and carried out computational experiments on benchmarks. As a result, configuration parameters of the algorithm were specified. The obtain results on the average by 15 % are better in the value of the objective function of the developed modified genetic algorithm than in other tested algorithms. Time complexity of the developed modified genetic algorithm can be represented as  $O(n \log n)$  in the best case and  $O(n^2)$  in the worst case.*

**Keywords:** electromagnetic compatibility, layout of PCB elements, multi-criteria optimization, genetic algorithm, mutation, crossing-over

### References

1. **Alpert C. J., Dinesh P. M., Sachin S. S.** Handbook of Algorithms for Physical design Automation, Auer Bach Publications Taylor & Francis Group, USA, 2009.
2. **Sherwani N. A.** Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Third Edition, Kluwer Academic Publisher, USA, 2013.
3. **Lim S. K.** Practical Problems in VLSI Physical Design Automation, Springer Science + Business Media B.V, Germany, 2008.
4. **Suzdal'cev I. V.** Metodika reshenija zadach proektirovaniya pechatnyh plat cifrovyyh jelektronnyh sredstv s uchetoм kriteriev jelektromag-

nitnoj sovместimosti, s ispol'zovaniem jevoljucionnyh algoritmov (Methods for solving the problems of designing printed circuit boards of digital electronic devices with consideration of the criteria of electromagnetic compatibility, using evolutionary algorithms), *Jelektromagnitnaja sovместimost' i jelektromagnitnaja jekologija: sb. nauch. dokl. 9-go Mezhdunar. simp.*, SPb., LJeTI, 2011, pp. 220–222 (in Russian).

5. **Chermoshencev S. V.** *Mnogokriterial'naja optimizacija jelektromagnitnoj sovместimosti mezhsjoedinenij pechatnyh plat cifrovyyh jelektroennyh sredstv geneticheskimi algoritmi* (Multi-criteria optimization of electromagnetic compatibility of interconnections of digital electronic circuit boards using genetic algorithms), *Jelektromagnitnaja sovместimost': Sb. dokl. VII Ros. nauch.-tehn. konf.*, SPb., 2002, pp. 298–300 (in Russian).

6. **H'jubing T., H'jubing N., Ochur O.** *Jelektromagnitnaja sovместimost' irazvodka pechatnyh plat* (Electromagnetic compatibility and PCB layout), *Tehnologii v Jelektroonnoj Promyshlennosti*, Sankt-Peterburg, Media KiT, 2017, no. 93, pp. 18–20 (in Russian).

7. **Rodzin S. I., Kureichik V. V.** *Teoreticheskie voprosy i sovremennye problemy razvitiya kognitivnyh bioinspirirovannyh algoritmov optimizacii (obzor)* (Theoretical questions and contemporary problems of the development of cognitive bio-inspired optimization algorithms (review)), *Kibernetika i Programirovanie*, 2017, no. 3, pp. 51–79 (in Russian).

8. **Kureichik V. V., Bova V. V., Kureichik VI. VI.** *Kombinirovannyj poisk pri proektirovanii* (Combined design search), *Obrazovatel'nye Resursy i Tehnologii*, 2014, no. 2 (5), pp. 90–94 (in Russian).

9. **Kureichik V. V., Kureichik VI. VI.** *Bioinspirirovannyj poisk pri proektirovanii i upravlenii* (Bio-search for design and management), *Izvestiya JuFU. Tehnicheskie Nauki*, 2012, no. 11 (136), pp. 178–183 (in Russian).

10. **Ficici S. G.** *Solution Concepts in Coevolutionary Algorithms: A Doctor of Philosophy Diss.* Brandeis University, 2004.

11. **Kureichik V. V., Kureichik VI. VI.** *Bioinspirirovannyj algoritm razbieniya skhem pri proektirovanii SBIS* (Bioinspired algorithms for partitioning VLSI circuits in design), *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie Nauki*, 2013, no. 7 (144), pp. 23–29 (in Russian).

12. **Kureichik V. V., Zaruba D. V., Zaporozhec D. Ju.** *Bioinspirirovannyj algoritm komponovki blokov JeVA na osnove modifirovannoj raskraski grafa* (Bioinspiral algorithm for composing EVA blocks based on the modified coloring of the graph), *Izvestiya JuFU. Tehnicheskie Nauki*, 2015, no. 4 (165), pp. 6–14 (in Russian).

13. **Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M.** *Geneticheskie algoritmy* (Genetic algorithms), Moscow Fizmatlit, 2010 (in Russian).

14. **Gladkov L. A., Gladkova N. V., Gordienko V. N.** *Modifirovannyj geneticheskij algoritm reshenija zadachi komponovki blokov JeVA* (Modified genetic algorithm for solving the EVA block layout problem), *Informatika, Vychislitel'naja Tehnika i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2015, no. 4 (24), pp. 18–27 (in Russian).

15. **Kureichik V. V., Kureichik V. M.**, *Geneticheskij algoritm razbieniya grafa* (Genetic algorithms for graf partitioning), *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 1999, no. 4, pp. 79–87 (in Russian).

16. **Muhlaeva I. V.** *Komponovka na osnove GA* (Layout based on GA), *Izvestiya Juzhnogo Federal'nogo Universiteta. Tehnicheskie Nauki*, 2012, no. 8 (43), pp. 84–85 (in Russian).

17. **Kureichik V. V., Zhilenkov M. A.** *Geneticheskij algoritm dlja reshenija optimizacionnyh zadach s javno vyrazhennoj celevoj funkciej* (Genetic algorithm for solving optimization problems with an explicit objective function), *Informatika, Vychislitel'naja Tehnika i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2014, no. 4 (19), pp. 1–8 (in Russian).

18. **Fonseca C. M., Fleming P. J.** *Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*, *Proc. of the 5th Intern. Conf. on Genetic Algorithms*. San Mateo, California, 1993, pp. 416–423.

19. **Kureichik V. V., Kureichik V. M.** *On genetic-based control*, *Avtomatika i Telemekhanika*, 2001, no. 10, pp. 174–187.

20. **Kacprzyk J., Kureichik V. M., Malioukov S. P., Kureichik V. V., Malioukov A. S.** *Experimental investigation of algorithms developed*, *Studies in Computational Intelligence*, 212, 2009, pp. 211–223, 227–236.

УДК 004.94, 620.91

DOI: 10.17587/it.24.244-251

**Д. Н. Кобзаренко**, д-р техн. наук, зав. лаб., kobzarenko\_dm@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра Российской академии наук, Махачкала

## Технологии геоинформационного моделирования пространственного распределения геотермальных ресурсов

*Рассматриваются технологии геоинформационного моделирования распределения потенциальных геотермальных ресурсов и технически доступных геотермальных ресурсов на примере Дагестана.*

*Одной из задач, которая предшествует освоению потенциального тепла сухих пород, является задача получения информации о пространственном распределении геотермальных ресурсов. Решение такой задачи позволяет: выявить и обозначить территории, которые обладают наибольшим геотермальным потенциалом, сопоставить эти территории с объектами инфраструктуры, а также с картами потенциала ветровой и солнечной энергии для возможного комбинированного использования. Данная информация очень важна при выборе оптимальных площадей для строительства объектов геотермальной энергетики.*

**Ключевые слова:** геоинформационные технологии, геоинформационное моделирование, потенциальные геотермальные ресурсы, технически доступные геотермальные ресурсы

### Введение

Интерес к возобновляемым источникам энергии как в России, так и в мире за последнее время

не только не ослабевает, но и возрастает. Международное энергетическое агентство в официально опубликованном статистическом отчете о балансах мировой энергетики в 2016 г. [1] приводит

данные о том, что самый максимальный рост по выработке энергии в 2013—2014 годах в 11 % демонстрируют возобновляемые источники энергии (причем гидроэнергия здесь не учитывается, поскольку рассматривается как самостоятельный источник энергии). Для сравнения процентный рост по остальным источникам энергии в 2—3 раза меньше, чем по возобновляемым. Под возобновляемыми источниками понимаются геотермальная, ветровая и солнечная виды энергии. Следует отметить, что в последнее время набирают популярность методы и комбинированные установки комплексного освоения возобновляемой энергии: геотермальная-солнечная, солнечная-ветровая.

Текущее состояние научно-технологического прогресса в области геотермальной энергетики позволяет осваивать пока только гидрогеотермальные ресурсы подземных вод. Такие ресурсы имеют далеко не все регионы, поэтому их использование возможно лишь на определенных территориях, обладающих высоким гидрогеотермальным потенциалом. Но будущее за освоением петрогеотермальных ресурсов тепла сухих пород, имеющих огромный энергетический потенциал, которые находятся в избытке практически на любой территории.

В связи со сказанным выше одной из задач, которая предшествует освоению потенциально-го тепла сухих пород, является задача получения информации о пространственном распределении геотермальных ресурсов.

Задача получения информации о пространственном распределении геотермальных ресурсов — комплексная и имеет ряд подзадач, таких как построение геологической модели и модели температурного поля региона, поэтому ее решение возможно с применением специализированных геоинформационных технологий, которые описываются в данной работе.

## 1. Технологическая основа геоинформационного моделирования

В основе представляемых геоинформационных технологий лежит так называемая система трехмерного геоинформационного моделирования (СТГМ), главные идеи которой описаны в работах [2, 3].

Концепция построения СТГМ (рис. 1) базируется на следующих определениях.

*Система трехмерного геоинформационного моделирования* направлена на решение задач, связанных с пространственными данными в области наук о Земле.

*Проект СТГМ* (ПР) — совокупность объединенных данных, ассоциируемая с объектом

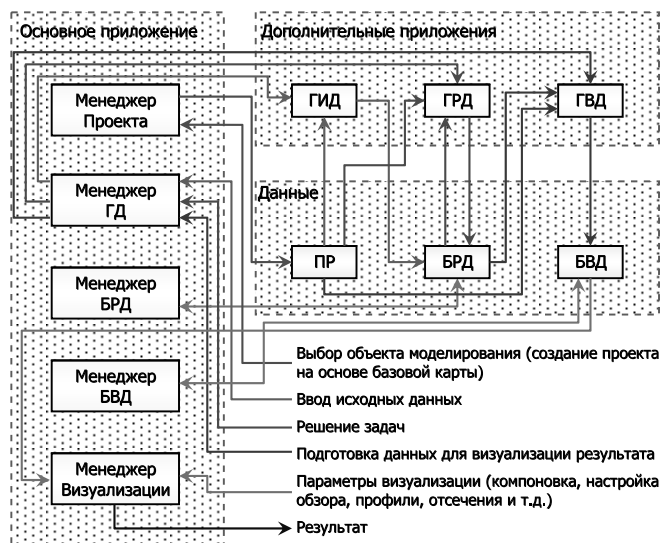


Рис. 1. Концепция построения системы трехмерного геоинформационного моделирования

моделирования — определенной территорией и масштабом.

*Библиотека расчетных данных* (БРД) — хранилище всей пространственно-атрибутивной информации в рамках текущего проекта, включающее как базовую (исходную), так и сгенерированную в процессе решения некоторой задачи информацию.

*Библиотека визуализируемых данных* (БВД) — хранилище информации, адаптированной для визуализации с использованием графической библиотеки OpenGL, и ее интерпретации (легенда).

*Генератор-импортер данных* (ГИД) — самостоятельное приложение, осуществляющее выполнение импорта данных в БРД текущего проекта. Приложение ГИД может запускаться только из основной ГИС и функционирует в рамках параметров текущего проекта. В зависимости от потребностей и имеющихся форматов исходных данных могут разрабатываться и добавляться в систему новые ГИД.

*Генератор расчетных данных* (ГРД) — самостоятельное приложение, осуществляющее выполнение совокупности операций (решение некоторой задачи) над группой данных из БРД текущего проекта и сохраняющее результат операций в той же БРД текущего проекта. Приложение ГРД может запускаться только из основной ГИС и функционирует в рамках параметров текущего проекта. Функциональность системы определяется совокупностью генераторов расчетных данных. Расширение функциональности СТГМ — разработка и добавление новых ГРД.

*Генератор визуализируемых данных* (ГВД) — самостоятельное приложение, осуществляющее преобразование группы данных из БРД в фор-

мат, адаптированный для визуализации, и сохраняющее результат в БВД текущего проекта.

СТГМ может функционировать и как решающая система, и как система комплексной визуализации данных. Геоинформационное моделирование выполняется в рамках проекта, создаваемого в СТГМ. Проект является информационной основой для решения задач и комплексной визуализации данных.

Любая задача решается в СТГМ путем разбиения ее на дерево подзадач и последовательного их решения снизу вверх. На первом уровне выполняется импорт исходных данных, которые заносятся в БРД текущего проекта с помощью модуля импорта данных. Затем снизу вверх по дереву решаются подзадачи с использованием библиотеки ГРД. Все промежуточные решения заносятся в БРД. Когда получен окончательный результат, из БРД выбираются данные, которые мы хотим визуализировать. На основе этих данных с помощью ГВД создаются визуализируемые структуры и заносятся в БВД. Из БВД формируются картины комплексной визуализации в проекте.

Для того чтобы с помощью СТГМ решать заявленную задачу, разработаны соответствующие компоненты как общего, так и специализированного назначения.

## 2. Создание проекта и построение базовых моделей

Основой для выполнения моделирования распределения геотермальных ресурсов является проект СТГМ. На базе общегеографической карты Дагестана масштаба 1:500000 создан проект "Республика Дагестан". Модель в проекте имеет размеры 427 км (высота) на 289 км (ширина) в реальном выражении. Единица измерения в координатах проекта, составляющая минимальный уровень генерализации данных, равна 50 м в реальном выражении.

Базовые компоненты модели: рельеф, населенные пункты с названиями, реки, автотрассы, водоемы, железные дороги также векторизованы на общегеографической карте Дагестана. С помощью ГИД *GidDxfExcel* векторизованные данные для базовых компонентов модели трансформированы и добавлены в БРД проекта в виде файлов расчетной структуры данных типа "Векторные объекты". На основе данных типа "Векторные объ-

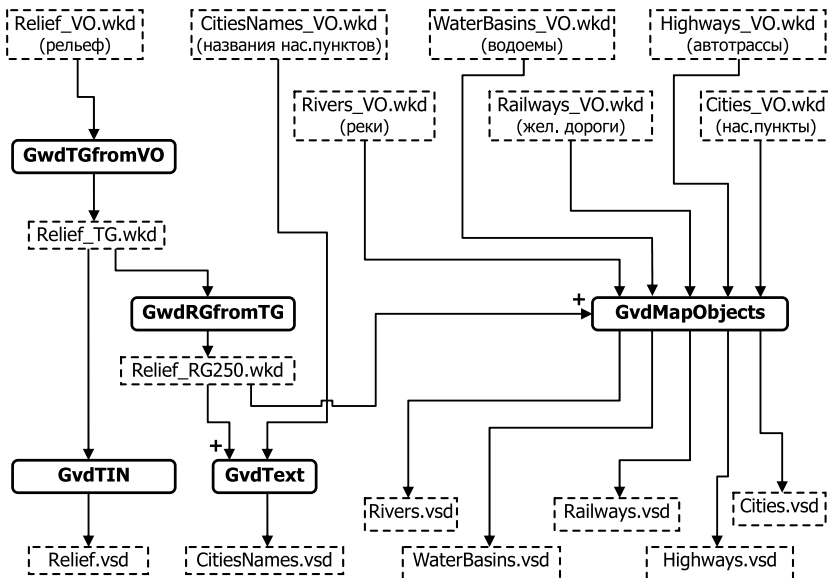


Рис. 2. Последовательность преобразования данных при построении базовой картографической части модели

екты" по рельефу с помощью ГРД *GwdTGfromWV* сгенерирована триангуляционная сеть цифровой модели рельефа (ЦМР). Затем с помощью ГРД *GwdRGfromTG* сгенерирована непрерывная регулярная сеть ЦМР с уровнем генерализации 250 м. Далее с помощью ГВД *GvdTIN*, ГВД *GvdMapObjects* и ГВД *GvdText* сгенерированы визуализируемые данные: триангуляционная сеть (ЦМР) и покрытия (реки, водоемы, автотрассы, населенные пункты, названия населенных пунктов, железные дороги) (рис. 2).

**Геологическая модель.** Данные выхода стратиграфических горизонтов на поверхность векторизованы из Геологического атласа Северного Кавказа масштаба 1:1000000 [4]. Данные глубины залегания стратиграфических горизонтов выбраны из архивов фонда скважин организаций "Дагбургеотермия" и "Дагнефть". Положения скважин нанесены на картографическую основу, а данные глубин залегания горизонтов занесены в таблицу атрибутов.

На территории Дагестана скважинами глубокого бурения вскрыты 16 горизонтов: четвертичные отложения неразделенные (Q); плиоцен, апшеронский ярус (N<sub>2ар</sub>); плиоцен, акчагыльский ярус (N<sub>2ак</sub>); верхний миоцен, сарматский ярус (N<sub>1<sup>3</sup>sm</sub>); средний миоцен, караганский и конский ярусы (N<sub>1<sup>2</sup>kg + kn</sub>); средний миоцен, чокракский и тарханский ярусы (N<sub>1<sup>2</sup>ch + t</sub>); нижний миоцен + олигоцен (N<sub>1<sup>1</sup> + Pg<sub>3</sub></sub>); эоцен + палеоцен (Pg<sub>1+2</sub>); верхний мел (K<sub>2</sub>); нижний мел (K<sub>1</sub>); верхняя юра (J<sub>3</sub>); средняя юра (J<sub>2</sub>); нижняя юра (J<sub>1</sub>); верхний триас (T<sub>3</sub>); средний триас (T<sub>2</sub>); нижний триас (T<sub>1</sub>).

Построение геологической модели выполнено по методике и алгоритмам, описанным в рабо-

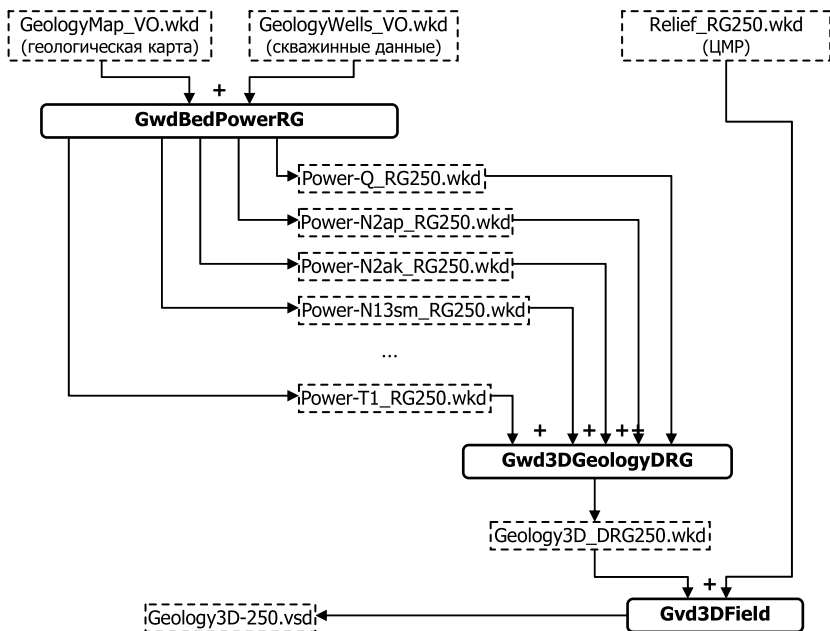


Рис. 3. Последовательность преобразования и обработки данных при построении геологической модели

те [5]. Последовательность построения геологической модели в рамках СТГМ приведена на рис. 3. На основе оцифрованных данных изолиний горизонтов геологической карты *GeologyMap\_VO.wkd* и скважинных данных *GeologyWells\_VO.wkd* с помощью ГРД *GwdBedPowerRG* генерируются регулярные сети мощностей горизонтов, а на их основе с помощью ГРД *Gwd3DGeology* генерируется трехмерная регулярная сеть геологической модели (*Geology3D\_DRG250.wkd*). Файл визуализируемой структуры данных (*Geology3D-250.vsd*) генерируется с помощью ГВД *Gvd3DField*.

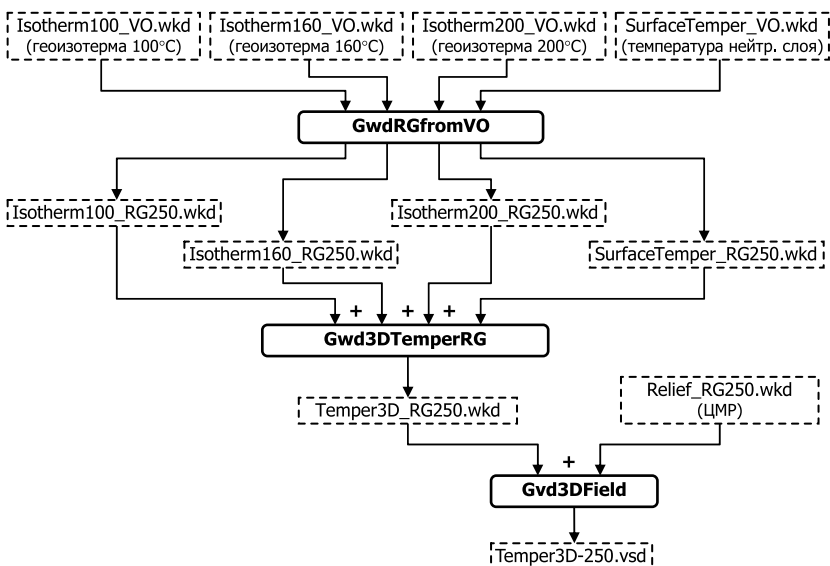


Рис. 5. Последовательность преобразования и обработки данных при построении трехмерного температурного поля

Результирующая геологическая модель представлена файлом структуры расчетных данных "Дискретная регулярная сеть (3D)" (*Geology3D\_DRG250.wkd*) и файлом визуализируемой структуры данных "Трехмерное поле" (*Geology3D-250.vsd*). Объем данных модели составляет приблизительно 1 Гбайт, из них около 470 Мбайт занимает 3D дискретная регулярная сеть и примерно такой же размер у визуализируемой структуры. Визуализация геологической модели в СТГМ представлена на рис. 4 (см. вторую сторону обложки).

**Трехмерная модель температурного поля.** Для расчета трехмерного температурного поля использовали известные карты глубины залегания геоизотерм 100, 160, 200 °С [6] и температуры нейтрального слоя [7].

Построение трехмерного температурного поля выполнено до глубины 5000 м по методике и алгоритмам, описанным в работе [5]. Последовательность построения модели температурного поля в рамках СТГМ приведена на рис. 5. На основе первичных векторизованных данных изолиний геоизотерм и температур нейтрального слоя с помощью ГРД *RGFromVO* создаются файлы регулярных сетей геоизотерм и температуры нейтрального слоя. Полученные регулярные сети являются основой расчета трехмерной модели температурного поля с помощью ГРД *Gwd3DTemperRG*, которая сохраняется в файл *Temper3D\_RG250.wkd*. Файл визуализируемой структуры данных (*Temper3D-250.vsd*) генерируется с помощью ГВД *Gvd3DField* на основе регулярной сети ЦМР и трехмерной регулярной сети температурного поля.

Моделирование выполнено с уровнем генерализации регулярных сетей по  $XY$  — 250 м. Шаг по глубине выбран равным 50 м. Результирующая модель температурного поля представлена файлом структуры расчетных данных "Непрерывная регулярная сеть (3D)" (*Temper3D\_RG250.wkd*) и файлом визуализируемой структуры данных "Трехмерное поле" (*Temper3D-250.vsd*). Объем всех данных, связанных с температурной моделью, составляет приблизительно 1,2 Гбайт, из них около 790 Мбайт занимает 3D непрерывная регулярная сеть и около 400 Мбайт — визуализируемая структура. Визуализация модели до 5000 м в СТГМ представлена на рис. 6 (см. вторую сторону обложки).

### 3. Расчет потенциальных геотермальных ресурсов

Расчет потенциальных геотермальных ресурсов выполняется по следующей формуле [10]:

$$Q^p = kc_\gamma(H_{\text{пр}} - h_{\text{н.с}})(t_{\text{из}} - t_{\text{о.с}}), \quad (1)$$

где  $Q^p$  — плотность распределения ресурсов, т у.т./м<sup>2</sup> (т у.т. — тонна условного топлива);  $k$  — коэффициент пересчета, т у.т./Дж;  $c_\gamma$  — объемная теплоемкость пород, Дж/(м<sup>3</sup>·°C);  $H_{\text{пр}}$  — прогнозная глубина бурения, м;  $h_{\text{н.с}}$  — глубина нейтрального слоя, м;  $t_{\text{о.с}}$  — температура окружающей среды, °C;  $t_{\text{из}}$  — средняя температура массива, °C;  $t_{\text{из}} = 0,5(t_{\text{пр}} + t_{\text{н.с}})$ ;  $t_{\text{пр}} = G(H_{\text{пр}} - h_{\text{н.с}}) + t_{\text{н.с}}$ ;  $t_{\text{н.с}}$  — температура нейтрального слоя, °C;  $t_{\text{пр}}$  — температура пород на прогнозируемой глубине, °C;  $G$  — геотермический градиент, °C/м.

Для выполнения расчета необходимо иметь в формате непрерывной регулярной сети следующие данные: средняя объемная теплоемкость массива пород; температура на прогнозируемой глубине бурения; температура нейтрального слоя; температура окружающей среды. Нами взяты средние значения объемной теплоемкости пород для стратиграфических горизонтов из работы [8]. Данные температуры нейтрального слоя взяты из работы [7], а данные температуры окружающей среды в зимний период — из Атласа Республики Дагестан [9]. Температура на прогнозируемой глубине находится по уже рассчитанной трехмерной модели распределения температурного поля.

Расчет потенциальных геотермальных ресурсов выполнен для прогнозных глубин бурения 3000 м и 5000 м. Последовательность расчета

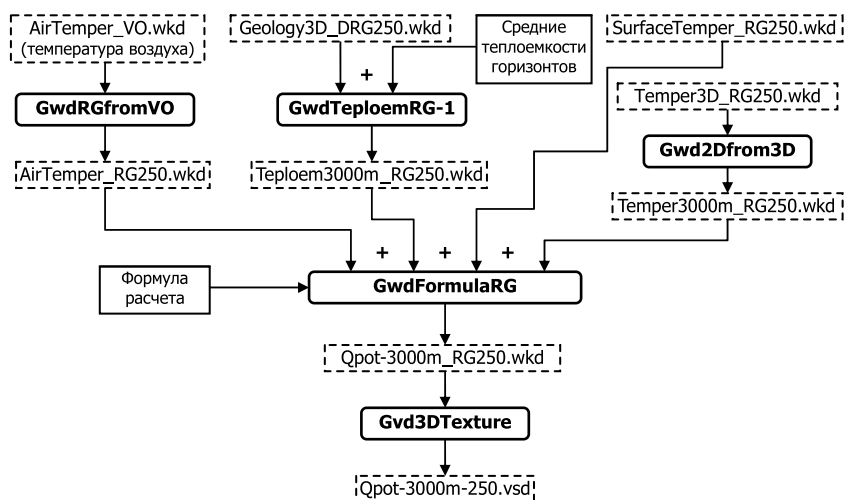


Рис. 7. Последовательность преобразования и обработки данных при расчете распределения потенциальных геотермальных ресурсов

распределения потенциальных геотермальных ресурсов в рамках СТГМ с учетом полученных ранее данных приведена на рис. 7.

На рис. 8 (см. третью сторону обложки) представлена картографическая модель распределения потенциальных геотермальных ресурсов до прогнозной глубины бурения 5000 м. Примерами наиболее перспективных районов с точки зрения общего потенциала геотермальной энергии являются: окрестности населенного пункта Буйнакск; предгорная часть Дагестана между населенными пунктами Каспийск и Избербаш; северо-западная часть Дагестана к юго-западу от населенного пункта Южно-Сухокумск; район к северо-западу от населенного пункта Кизляр.

Сравнить полученные результаты с какими-либо подобными работами в региональном масштабе не представляется возможным, поскольку такого рода карты не публиковались. Что касается общероссийских карт распределения потенциальных геотермальных ресурсов, то согласно карте технического потенциала геотермальных энергоресурсов России [10] Дагестан обладает потенциалом более 20 млн т у.т., что подтверждается картографической моделью ресурсов до 5000 м на рис. 8 (см. третью сторону обложки).

### 4. Расчет технически доступных геотермальных ресурсов

Для режима 70/20 °C (горячее водоснабжение) плотность технически доступных ресурсов геотермальной энергии определяется следующим выражением [9]:

$$Q_T = k\xi C_V(H_H - H_B)(t_{\text{из}} - 20), \quad (2)$$

где  $Q_T$  — плотность ресурсов, т у.т./м<sup>2</sup>;  $k$  — коэффициент пересчета;  $C_V$  — объемная теплоемкость пород, Дж/(м<sup>3</sup>·°C);  $\xi$  — коэффициент температурного извлечения ( $\xi = 0,125$ );  $H_H$  — нижняя граница ресурсного интервала, м ( $H_H = 6000$  м);  $H_B$  — верхняя граница ресурсного интервала, м;  $H_B = [(t_B - t_{\text{н.с}})/G] + h_{\text{н.с}}$ ;  $G$  — геотермический градиент, °C/м;  $t_{\text{из}} = 0,5(t_B - t_{\text{н.с}})$ ;  $t_B$  — температура на верхней границе ресурсного интервала, °C (в этом режиме для получения теплоносителя с температурой не менее 70 °C средняя температура массива  $t_{\text{из}}$  с учетом потерь при транспортировке должна быть не менее 80 °C);  $t_{\text{н.с}}$  — температура на ниж-



ней границе массива ресурсного интервала, °C;  $t_H = G(H_H - h_{H,c}) + t_{H,c}$ . Исходя из положения  $t_{из} \geq 80$  °C:  $t_B = 2t_{из} - t_H$ , тогда минимальное значение  $t_B = 160 - t_H$ . При высоких значениях  $t_H$  вводится ограничение  $t_B \geq 30$  °C.

Плотность технически доступных ресурсов геотермальной энергии в режиме 90/40 °C определяется по формуле (3) [10]

$$Q_T = k\xi C_V (H_H - H_B)(t_{из} - 40). \quad (3)$$

Для обеспечения температуры теплоносителя, равной 90 °C, средняя температура массива должна быть не менее 100 °C, а заданная температура на верхней границе ресурсного интервала — не менее 50 °C.

Расчет технически доступных геотермальных ресурсов выполнен для обоих режимов: горячего водоснабжения и отопления. Все регулярные сети, участвующие в расчете, созданы с уровнем генерализации по XY — 250 м. Последовательность расчета распределения технически доступных геотермальных ресурсов для режима горячего водоснабжения в рамках СТГМ с учетом полученных ранее данных приведена на рис. 9.

Для режима горячего водоснабжения в расчете используются геоизотермы 30 и 130 °C, которые задают глубину верхней и нижней границ ресурсного интервала соответственно. Для режима отопления расчет аналогичный, за исключением того, что вместо температуры извлечения 80 °C

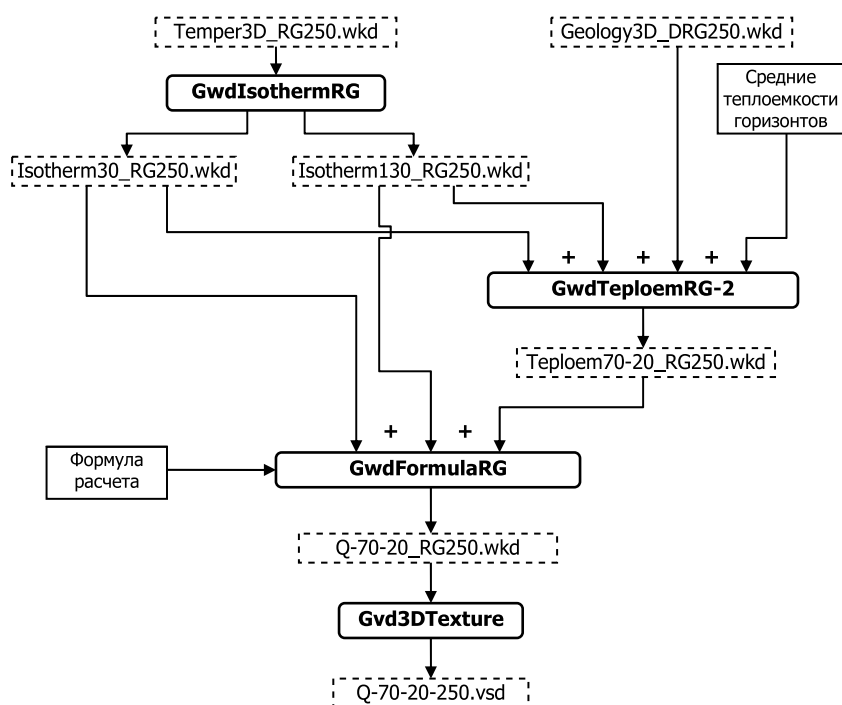


Рис. 9. Последовательность преобразования и обработки данных при расчете распределения технически доступных геотермальных ресурсов

задается температура — 100 °C, а для задания верхней и нижней границ ресурсного интервала используются геоизотермы 50 и 150 °C.

На рис. 10 (см. третью сторону обложки) представлена картографическая модель распределения технически доступных геотермальных ресурсов для использования в режимах горячего водоснабжения. Согласно полученным результатам выявлены области, которые являются наиболее перспективными с точки зрения технического потенциала использования геотермальной энергии в коммунальном секторе. Для горячего водоснабжения перспективными являются районы Центрального Дагестана, окрестности населенных пунктов Кизилюрт, Шамхал, Сулак, Хасавюрт и Кизляр. Для отопления перспективными являются вся зона Предгорного Дагестана с севера на юг и северная часть республики начиная с населенного пункта Кизляр.

Согласно общероссийской карте распределения технически доступных геотермальных ресурсов, представленной в работе [10], горная часть Дагестана обладает потенциалом технически доступных геотермальных ресурсов для режима горячего водоснабжения 4...6 т у.т./м<sup>2</sup> и для отопления 2...4 т у.т./м<sup>2</sup>. Предгорные, центральные и северные районы республики на тех же картах отмечены потенциалом выше 6 т у.т./м<sup>2</sup> для горячего водоснабжения и 4...6 т у.т./м<sup>2</sup> для отопления. Сопоставив результаты наших расчетов с оценкой технически доступных ресурсов Дагестана, представленной в работе [10], можно увидеть приблизительно двукратную разницу. Причиной этого, скорее всего, является использование совершенно разных масштабов для исследования — всероссийского и регионального. Но главным в наших исследованиях является не столько количественная оценка геотермальных ресурсов, сколько выявление наиболее перспективных площадей.

## Заключение и выводы

Представлены технологии геоинформационного моделирования, которые позволяют решать задачу оценки пространственного распределения потенциала геотермальных ресурсов в региональном масштабе. Гибкий подход в построении системы трехмерного геоинформационного моделирования на основе отдельных программных блоков — генераторов данных и

унифицированных форматов для файлов позволяет вносить корректировки в алгоритмы и методику расчетов.

Полученные геоинформационные модели распределения потенциальных и технически доступных геотермальных ресурсов могут служить ценной информацией для принятия решения о более подробном изучении перспективных с точки зрения геотермальной энергии площадей и строительстве объектов геотермальной энергетики и ее комплексного использования с солнечной и ветровой энергией.

#### Список литературы

1. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-balances---2016-edition---excerpt---key-world-energy-trends.html>
2. Кобзаренко Д. Н. Автоматизированное построение карты распределения величины, заданной функциональной зависимостью // Геоинформатика. 2009. № 2. С. 37–40.

3. Кобзаренко Д. Н., Камилова А. М., Гаджимурадов Р. Н. Концепция построения системы трехмерного геоинформационного моделирования // Информационные технологии. 2009. № 11. С. 32–36.

4. **Геологический** атлас Северного Кавказа (масштаб 1:1000000) / Под ред. Н. И. Пруцкого. Ессентуки: Кавказгеолъемка, 1999.

5. Кобзаренко Д. Н. Алгоритмическое и программное обеспечение оценки распределения геотермальных ресурсов. Махачкала: АЛЕФ, 2011. 200 с.

6. Курбанов М. К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука, 2001. 260 с.

7. Амирханов Х. И., Суетнов В. В., Левкович Р. А., Габрибеков Х. А. Тепловой режим осадочных толщ. Махачкала, 1972. 230 с.

8. **Проблемы** геотермальной энергетики Дагестана / Под ред. Х. И. Амирханова, С. Н. Ятрова. М.: Недра, 1980. 208 с.

9. **Атлас** Республики Дагестан. Москва, Федеральная служба геодезии и картографии России. 1999. 65 с.

10. Богуславский Э. В. Тепловые ресурсы недр России // Теплоэнергетика. 2004. № 6. С. 25–32.

DOI: 10.17587/it.24.244-251

**D. N. Kobzarenko**, D.Sc., Head of Laboratory, e-mail: kobzarenko\_dm@mail.ru  
Federal State Budgetary Institution of Science "Institute for Geothermal Research of Dagestan  
Scientific Center of Russian Academy of Sciences", Makhachkala, Russia

## Technologies for Geoinformation Modeling of Spatial Distribution of Geothermal Resources

*The paper deals with the technologies of geoinformation modeling of potential geothermal resources and technically accessible geothermal resources distribution on the example of Dagestan.*

*One of the tasks that precedes the development of potential heat of dry rocks is the task of obtaining information on the spatial distribution of geothermal resources. The solution of this problem allows: to identify the territories that have the greatest geothermal potential, to compare these territories with the objects of infrastructure, as well as with maps of the potential of wind and solar energy for possible combined use. This information is very important when choosing the optimal areas for the construction of geothermal energy facilities.*

*The task of obtaining information on the spatial distribution of geothermal resources is complex and has a number of sub-tasks, such as the construction of a geological model and a model of the temperature field of the region, so its solution is possible with the use of specialized geoinformation technologies. In these geoinformation technologies lies the concept of constructing a system of three-dimensional geoinformation modeling (STMG).*

*A three-dimensional geoinformation model of the territory of Dagestan was created in STMG. Within the framework of the project, three-dimensional geological model and a three-dimensional model of the temperature field were constructed, which formed the basis for the construction of cartographic models for the distribution of potential geothermal resources and technically accessible geothermal resources.*

*As a result of geoinformation modeling, the regions of Dagestan are identified, which are the most promising from the point of view of the technical potential of using geothermal energy in the communal sector. For hot water supply are promising areas of Central Dagestan, the neighborhoods of settlements: Kizilyurt, Shamkhal, Sulak, Khasavyurt and Kizlyar. For heating perspective: the whole area of Piedmont Dagestan from north to south and the northern part of the republic, starting from the settlement of Kizlyar.*

**Keywords:** geoinformation technologies, geoinformation modeling, potential geothermal resources, technically accessible geothermal resources

## References

1. Available at: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-balances---2016-edition---excerpt---key-world-energy-trends.html>
2. **Kobzarenko D. N.** *Avtomatizirovannoe postroenie karty raspredeleniya velichiny, zadannoj funkcional'noj zavisimost'yu* (Automated construction a map of the distribution of a quantity given by a functional dependence), *Geoinformatika*, 2009, no. 2, pp. 37–40 (in Russian).
3. **Kobzarenko D. N., Kamilova A. M., Gadzhimuradov R. N.** *Koncepciya postroeniya sistemy trekhmernogo geoinformacionnogo modelirovaniya* (The concept of building a system of three-dimensional geoinformation modeling), *Informacionnye tekhnologii*, 2009, no. 11, pp. 32–36 (in Russian).
4. **Geologicheskij atlas Severnogo Kavkaza, masshtab 1:1000000** (Geological Atlas of The North Caucasus, Scale 1:1000000). Ed. N. I. Pruckogo ed., Essentuki, FGUP Kavkazgeols'emka, 1999 (in Russian).
5. **Kobzarenko D. N.** *Algoritmicheskoe i programnoe obespechenie ocenki raspredeleniya geotermal'nyh resursov* (Algorithmic and software for estimating the distribution of geothermal resources), Mahachkala, *ALEF*, 2011, 200 p. (in Russian).
6. **Kurbanov M. K.** *Geotermal'nye i gidromineral'nye resursy Vostochnogo Kavkaza i Predkavkaz'ya* (Geothermal and hydromineral resources of the Eastern Caucasus and Ciscaucasia), Moscow, Nauka, 2001, 260 p. (in Russian).
7. **Amirhanov H. I., Suetnov V. V., Levkovich R. A., Gairbekov H. A.** *Teplovoj rezhim osadochnyh tolshch* (Thermal mode of sedimentary strata), Mahachkala, 1972, 230 p. (in Russian).
8. **Amirhanov H. I., Yatrov S. N.** *Problemy geotermal'noj ehnergetiki Dagestana* (Problems of geothermal power engineering in Dagestan), Moscow, Nedra, 1980, 208 p. (in Russian).
9. **Atlas Respubliki Dagestan** (Atlas of the Republic of Dagestan), Moscow, Federal'naya sluzhba geodezii i kartografii Rossii, 1999, 65 p. (in Russian).
10. **Boguslavskij E. V.** *Teplovyte resursy nedr Rossii* (Thermal resources of Russia's mineral resources), *Teploehnergetika*, 2004, No. 6, pp. 25–32 (in Russian).

УДК 519.67

DOI: 10.17587/it.24.251-255

**А. А. Дубанов**, канд. тех. наук, доц., e-mail: [alandubanov@mail.ru](mailto:alandubanov@mail.ru),  
Сибирский Государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Улан-Удэ

## Задача преследования. Решение в системе вычислительной математики MathCAD

Описываются модели решения задачи преследования по пересеченной местности. Ландшафт местности представлен точечным базисом с выполненной полиномиальной регрессией, которая позволяет через массив точек  $Z_{i,j} = Z(X_i, Y_j)$  провести приближенную поверхность  $z = z(x, y)$ , состоящую из полиномиальных сегментов. По результатам математического моделирования созданы анимированные изображения.

**Ключевые слова:** задача преследования, траектория "кролика", траектория "лисы", точечный базис, уравнение ландшафта, пересеченная местность, прогнозирование траектории, анимированное изображение, траектория движения, траектория на плоскости

### Введение

В данной статье предлагаются методы решения классической задачи из школьного курса физики, описанной в замечательной книге "Задачи по физике" [1]. Позволю себе привести полный текст задачи № 13: "За лисой, бегущей равномерно и прямолинейно со скоростью  $v_1$ , гонится собака, скорость которой  $v_2$  постоянна по абсолютной величине и направлена все время на лису. В момент времени, когда скорости  $v_1$  и  $v_2$  оказались взаимно перпендикулярными, расстояние между лисой и собакой было равно  $l$ . Каково было ускорение собаки в этот момент?"

Мы в системе MathCAD будем решать похожие задачи, имеющие свое происхождение из указанной выше классической задачи. "Кролик" дви-

жется по случайной траектории. Его преследует "Лиса". Необходимо найти зависимость положения лисы от времени. Вектор скорости "Лисы" направлен на "Кролика" и по модулю неизменен.

### "Кролик" и "Лиса" движутся по плоскости

Пусть траектория движения "Кролика" (рис. 1) описывается уравнением  $R_{rabbit}(t) = \begin{cases} x_{rabbit}(t) \\ y_{rabbit}(t) \end{cases}$ , а траектория движения "Лисы":  $R_{fox}(t) = \begin{cases} x_{fox}(t) \\ y_{fox}(t) \end{cases}$ ,  $v_{fox}$  — абсолютная неизменная величина скорости движения "Лисы".

Тот факт, что вектор скорости движения "Лисы" направлен все время на "Кролика", и то, что абсо-

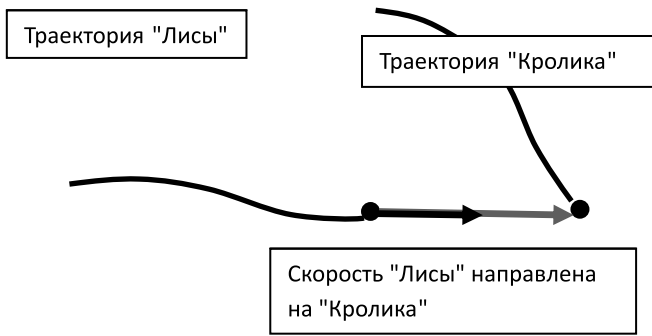


Рис. 1. "Кролик" движется по плоскости

лютная величина скорости движения "Лисы" равна  $v_{fox}$ , описывается системой уравнений (1):

$$\begin{aligned} & (x_{rabbit}(t) - x_{fox}(t)) \frac{dy_{fox}(t)}{dt} - \\ & - (y_{rabbit}(t) - y_{fox}(t)) \frac{dx_{fox}(t)}{dt} = 0; \quad (1) \\ & \left( \frac{dy_{fox}(t)}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dx_{fox}(t)}{dt} \right)^2 = v_{fox}^2, \end{aligned}$$

где  $R_{rabbit}(t) = \begin{cases} x_{rabbit}(t); \\ y_{rabbit}(t) \end{cases}$  — координаты траектории "Кролика" на плоскости;  $R_{fox}(t) = \begin{cases} x_{fox}(t); \\ y_{fox}(t) \end{cases}$  — координаты траектории "Лисы";  $v_{fox}$  — абсолютная величина скорости "Лисы",  $t$  — время.

Система уравнений (1) относительно переменных  $\frac{dx_{fox}(t)}{dt}$ ,  $\frac{dy_{fox}(t)}{dt}$  имеет решение

$$\begin{aligned} & \frac{dx_{fox}(t)}{dt} = \\ & = \frac{x_{rabbit}(t) - x_{fox}(t)}{\sqrt{(x_{fox}(t) - x_{rabbit}(t))^2 + (y_{fox}(t) - y_{rabbit}(t))^2}} v_{fox}; \\ & \frac{dy_{fox}(t)}{dt} = \\ & = \frac{y_{rabbit}(t) - y_{fox}(t)}{\sqrt{(x_{fox}(t) - x_{rabbit}(t))^2 + (y_{fox}(t) - y_{rabbit}(t))^2}} v_{fox}. \end{aligned}$$

Система уравнений (1) имеет два решения, но нами в расчет принимается только решение

$$\frac{dx_{fox}(t)}{dt} = - \frac{x_{rabbit}(t) - x_{fox}(t)}{\sqrt{(x_{fox}(t) - x_{rabbit}(t))^2 + (y_{fox}(t) - y_{rabbit}(t))^2}} v_{fox}, \quad (2)$$

поскольку решение

$$\frac{dy_{fox}(t)}{dt} = - \frac{y_{rabbit}(t) - y_{fox}(t)}{\sqrt{(x_{fox}(t) - x_{rabbit}(t))^2 + (y_{fox}(t) - y_{rabbit}(t))^2}} v_{fox}$$

соответствует тому, что вектор скорости "Лисы" направлен не на "Кролика", а в обратную от него сторону.

Если бы траектория движения "Кролика"

$R_{rabbit}(t) = \begin{cases} x_{rabbit}(t); \\ y_{rabbit}(t) \end{cases}$  имела бы явную функциональную зависимость от времени, то данная задача в таком математическом пакете, как MathCAD 15, реализовалась бы в несколько операторов, подводящих ко встроенным решателям систем дифференциальных уравнений 1-го порядка (rkfixed, Rkadapt и т.д.). По ссылке [2] можно скачать архивированный файл программы, выполненной в системе MathCAD 15, по ссылке вы сможете посмотреть анимированное изображение результатов работы данной программы [3].

### "Кролик" и "Лиса" движутся по пересеченной местности

Рассмотрим постановку задачи преследования "Лисой" "Кролика", двигающихся по пересеченной местности, заданной поверхностью  $Z = f(X, Y)$ . Траектория движения "Кролика" задается урав-

нением  $R_{rabbit}(t) = \begin{bmatrix} X_{rabbit}(t) \\ Y_{rabbit}(t) \\ Z_{rabbit}(t) \end{bmatrix}$ , где  $t$  — время дви-

жения "Кролика". Необходимо найти траекторию

движения "Лисы"  $R_{fox}(t) = \begin{bmatrix} X_{fox}(t) \\ Y_{fox}(t) \\ Z_{fox}(t) \end{bmatrix}$  при следую-

щих условиях:

- горизонтальная проекция скорости движения "Лисы" на плоскость  $(X, Y)$  направлена на горизонтальную проекцию точек движения "Кролика" (рис. 1);
- скорости движения "Кролика" и "Лисы" неизменны и равны  $V_{rabbit}$ ,  $V_{fox}$ .

Условия для решения поставленной задачи приводят к системе уравнений

$$\begin{cases} \frac{dX_{fox}}{dt} (Y_{rabbit} - Y_{fox}) = \frac{dY_{fox}}{dt} (X_{rabbit} - X_{fox}); \\ \left( \frac{dX_{fox}}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dY_{fox}}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dZ_{fox}}{dt} \right)^2 = (V_{fox})^2; \quad (3) \\ \frac{dZ_{fox}}{dt} = \frac{\partial f}{\partial X_{fox}} \frac{dX_{fox}}{dt} + \frac{\partial f}{\partial Y_{fox}} \frac{dY_{fox}}{dt}. \end{cases}$$

Первое уравнение системы (3) означает, что горизонтальная проекция вектора скорости "Лисы"  $V_{fox}$  на плоскость  $(X, Y)$  направлена на го-

ризонтальную проекцию  $\begin{bmatrix} X_{rabbit} \\ Y_{rabbit} \end{bmatrix}$  текущего по-

ложения "Кролика". Второе уравнение означает, что скорость передвижения "Лисы" равна постоянной величине  $V_{fox}$ . Третье уравнение получается из дифференцирования уравнения  $Z = f(X, Y)$  по времени  $t$ . Фактически это означает, что точка

траектории "Лисы"  $R_{fox}(t) = \begin{bmatrix} X_{fox}(t) \\ Y_{fox}(t) \\ Z_{fox}(t) \end{bmatrix}$  принадлежит

поверхности  $Z = f(X, Y)$ . Система уравнений (3) имеет решение в явном виде относительно переменных  $\frac{dX_{fox}}{dt}$ ,  $\frac{dY_{fox}}{dt}$ ,  $\frac{dZ_{fox}}{dt}$ :

$$\begin{cases} \frac{dX_{fox}}{dt} = \frac{V_{fox}(X_{rabbit} - X_{fox})}{\sqrt{(X_{rabbit} - X_{fox})^2 + (Y_{rabbit} - Y_{fox})^2 + \left( (X_{rabbit} - X_{fox}) \frac{\partial f(X_{fox}, Y_{fox})}{\partial X_{fox}} + (Y_{rabbit} - Y_{fox}) \frac{\partial f(X_{fox}, Y_{fox})}{\partial Y_{fox}} \right)^2}}; \\ \frac{dY_{fox}}{dt} = \frac{V_{fox}(Y_{rabbit} - Y_{fox})}{\sqrt{(X_{rabbit} - X_{fox})^2 + (Y_{rabbit} - Y_{fox})^2 + \left( (X_{rabbit} - X_{fox}) \frac{\partial f(X_{fox}, Y_{fox})}{\partial X_{fox}} + (Y_{rabbit} - Y_{fox}) \frac{\partial f(X_{fox}, Y_{fox})}{\partial Y_{fox}} \right)^2}}; \\ \frac{dZ_{fox}}{dt} = \frac{\partial f(X_{fox}, Y_{fox})}{\partial X_{fox}} \frac{dX_{fox}}{dt} + \frac{\partial f(X_{fox}, Y_{fox})}{\partial Y_{fox}} \frac{dY_{fox}}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

При реализации задачи, рассматриваемой в данной статье, в математических пакетах, в частности в системе MathCAD, мы предприняли следующее.

1. В системе AutoCAD была построена модель поверхности  $Z = f(X, Y)$ . Моделирование заключалось в том, что в выбранной области рабочего листа системы AutoCAD были сформированы замкнутые контуры горизонталей. Каждая из горизонталей имеет свою высоту. Посредством команды LIST системы AutoCAD для каждой из горизонталей формировался отдельный текстовый файл. Затем с помощью команды READPRN системы MathCAD данные файлы были введены в систему MathCAD. Далее с помощью команды regress для введенных данных  $Z_i = f(X_i, Y_i)$  были рассчитаны коэффициенты полиномиальной регрессии для передачи в процедуру интерполяции interp.

На плоскости  $(X, Y)$  была построена дополнительная равномерная сетка для проведения двумерной сплайн-интерполяции и построения поверхностей  $\frac{\partial f(X_{fox}, Y_{fox})}{\partial X_{fox}}$  и  $\frac{\partial f(X_{fox}, Y_{fox})}{\partial Y_{fox}}$ , которые используются при решении системы уравнений (4). Для проведения двумерной ку-

бической сплайн-интерполяции использовалась встроенная команда cspline.

2. В системе AutoCAD формируется массив горизонтальной проекции точек траектории "Кролика"  $\begin{bmatrix} X_{rabbit} \\ Y_{rabbit} \end{bmatrix}$ . Далее вводится формальный параметр  $t$ , чтобы мы могли построить параметриче-

скую функцию  $R_{rabbit}(t) = \begin{bmatrix} X_{rabbit}(t) \\ Y_{rabbit}(t) \\ Z_{rabbit}(t) \end{bmatrix}$ . В качестве

формального параметра  $t$  был выбран такой, который равномерно проходит через значения

$[0 \dots N - 1]$ , где  $N$  — число точек массива  $\begin{bmatrix} X_{rabbit} \\ Y_{rabbit} \end{bmatrix}$ .

После выполнения сплайн-интерполяции функция траектории движения "Кролика" принимает вид

$$R_{rabbit}(t) = \begin{bmatrix} X_{rabbit}(t) \\ Y_{rabbit}(t) \\ f(X_{rabbit}(t), Y_{rabbit}(t)) \end{bmatrix}.$$

Далее мы можем принять, что параметр  $t$  зависит от длины дуги  $s$  траектории движения "Кролика":

$$\frac{dt}{ds} = \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{dX_{rabbit}}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dY_{rabbit}}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dZ_{rabbit}}{dt} \right)^2}}.$$

Поскольку длина дуги траектории "Кролика"  $s = V_{rabbit}t$ , где  $t$  — это время движения "Кролика", то в качестве основного параметра можно использовать время  $t$ .

3. Анимированное изображение движения "Кролика" нами предоставлено в [4].

4. При заданных стартовых позициях "Кролика" и "Лисы", при заданных значениях  $V_{rabbit}$  и  $V_{fox}$  было получено численное решение системы дифференциальных уравнений (4). С результатом

анимации можно ознакомиться в [5]. На анимации видно, что при выбранных значениях "Лиса" догоняет "Кролика" несколько раз.

5. Полный листинг программы, выполненной в системе MathCAD с подробными комментариями, можно посмотреть в [6].

6. Полный архив программы представлен в [7].

### "Лиса" работает на опережение

Для прогнозирования "Лисой" движения "Кролика" мы предлагаем использовать следующую модель (рис. 2):

$$\begin{cases} \frac{dX_{fox}}{dt}(Y_{rabbit}^* - Y_{fox}) = \frac{dY_{fox}}{dt}(X_{rabbit}^* - X_{fox}); \\ \left(\frac{dX_{fox}}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dY_{fox}}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dZ_{fox}}{dt}\right)^2 = (V_{fox})^2; \\ \frac{dZ_{fox}}{dt} = \frac{\partial f}{\partial X_{fox}} \frac{dX_{fox}}{dt} + \frac{\partial f}{\partial Y_{fox}} \frac{dY_{fox}}{dt}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\begin{bmatrix} X_{rabbit}^* \\ Y_{rabbit}^* \end{bmatrix}$  — горизонтальная проекция вектора  $R_{rabbit}^*(t) = R_{rabbit}(t) + V_{rabbit}\Delta t$  (рис. 2). Здесь векторная величина скорости "Кролика" равна

$$V_{fox} = \begin{bmatrix} \frac{dX_{rabbit}}{dt} \\ \frac{dY_{rabbit}}{dt} \\ \frac{\partial f}{\partial X_{rabbit}} \frac{dX_{rabbit}}{dt} + \frac{\partial f}{\partial Y_{rabbit}} \frac{dY_{rabbit}}{dt} \end{bmatrix}.$$

На выборе параметра приращения по времени  $\Delta t$  остановимся подробнее. Введем следующую весовую функцию:

$$\varepsilon(\Delta r_{xy}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta r_{xy} \geq \Delta r_{xy}^0; \\ \frac{\Delta r_{xy}}{\Delta r_{xy}^0}, & \text{если } \Delta r_{xy} < \Delta r_{xy}^0, \end{cases}$$

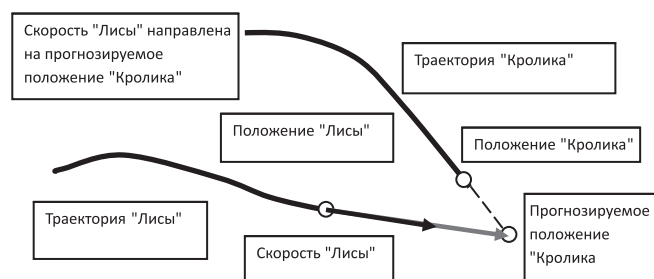


Рис. 2. "Лиса" прогнозирует движение "Кролика"

где  $\Delta r_{xy} = \sqrt{(X_{rabbit} - X_{fox})^2 + (Y_{rabbit} - Y_{fox})^2}$ ;  $\Delta r_{xy}^0$  — выбираемое нами пороговое значение дистанции между "Кроликом" и "Лисой". Прогнозируемое положение "Кролика" будет выглядеть так:  $R_{rabbit}^*(t) = R_{rabbit}(t) + \varepsilon(\Delta r_{xy})V_{rabbit}\Delta t$ . Измененный листинг программы в системе MathCAD можно посмотреть на сайте [8]. Анимированное изображение ситуации, когда "Лиса" бежит на опережение, можно посмотреть в [9], проекцию на горизонтальную плоскость — в [10].

### Заключение

В условиях развития вычислительной техники современные математические пакеты, такие как MathCAD, MATLAB и др., позволяют реализовать теоретические результаты в системах компьютерной математики. Теоретические основы для написания данной статьи взяты из источников [11, 12]. При построении вычислительного процесса в системе MathCAD мы воспользовались некоторыми алгоритмами, что были описаны в работах [13—15]. При вычислении длин траекторий мы воспользовались расчетной схемой, указанной в [16]. Данная модель преследования на пересеченной местности при построении анимированного изображения показала, что она может быть использована при написании операционных систем реального времени в робототехнических комплексах, разрабатываемых для решения задач преследования.

### Список литературы

1. Слободетский И. Ш., Асламазов Л. Г. Задачи по физике // Библиотека "Квант". 1980. Вып. № 5.
2. Архив программы "Кролик и Лиса на плоскости". URL: [http://blagovest2002.narod.ru/files/Fox\\_and\\_Rabbit\\_Sinusoud.rar](http://blagovest2002.narod.ru/files/Fox_and_Rabbit_Sinusoud.rar)
3. "Кролик" и "Лиса" на плоскости, анимированное изображение. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ExiC7n1mlKc>
4. Траектория "Кролика", анимированное изображение процесса передвижения "Кролика". URL: [http://www.youtube.com/watch?v=Xv\\_q\\_EgdUX4](http://www.youtube.com/watch?v=Xv_q_EgdUX4)
5. "Кролик" и "Лиса", анимированное изображение процесса преследования. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=dsfkqSIZGk8>,
6. Сайт "Геометрическое моделирование в системе MathCAD". URL: <http://dubanov.exponenta.ru>. Раздел "Статья "Fox and Rabbit" — "Программный код MathCAD с комментариями". URL: [http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Fox\\_and\\_Rabbit\\_2015.html](http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Fox_and_Rabbit_2015.html)
7. Сайт "Геометрическое моделирование в системе MathCAD". URL: <http://dubanov.exponenta.ru>. Архив программы "Fox and Rabbit". URL: [http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox\\_and\\_Rabbit.zip](http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox_and_Rabbit.zip)
8. Сайт "Геометрическое моделирование в системе MathCAD". URL: <http://dubanov.exponenta.ru>. Архив программы "Fox and Rabbit", "Лиса" работает на опережение. URL: [http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox\\_and\\_Rabbit.zip](http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox_and_Rabbit.zip)

9. **Анимированное** изображение, когда "Лиса" работает на опережение. Трехмерный вид. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=cerQXgDUwwM>

10. **Анимированное** изображение, когда "Лиса" работает на опережение. Проекция на горизонтальную плоскость. URL: [http://www.youtube.com/watch?v=\\_iQAFGB6iFM](http://www.youtube.com/watch?v=_iQAFGB6iFM)

11. **Понтрягин Л. С.** К теории дифференциальных игр // Успехи Математических Наук. 1966. Т. 21. Вып. 4 (130). С. 219–274.

12. **Айзекс Р.** Дифференциальные игры. М.: Мир, 1967. С. 88–117.

13. **Симакова Э. Н.** Об одной дифференциальной игре преследования // Автоматика и телемеханика. 1967. Вып. 2. С. 5–14.

14. **Бурдаков С. Ф., Сизов П. А.** Алгоритмы управления движением мобильного робота в задаче преследования // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. С. 49–57.

15. **Желнин Ю. Н.** Линеаризованная задача преследования и уклонения на плоскости // Ученые записки ЦАГИ. 1977. С. 88–97.

16. **Кузьмина Л. И., Осипов Ю. В.** Расчет длины траектории для задачи преследования. Вестник МГСУ. 2013. № 12. С. 20–26.

DOI: 10.17587/it.24.251-255

**A. A. Dubanov**, Associate Professor, e-mail: [alandubanov@mail.ru](mailto:alandubanov@mail.ru),  
Siberian State University of Telecommunication and Informatics

## The Pursuit Problem. The Decision on the System of Computational Mathematics MathCAD

*The description of model of the solution of a task of prosecution. It is conducted on a rough surface. The area landscape is presented by dot basis with the executed polynomial regression, which allows through the massif of points  $Z_{i,j} = Z(X_i, Y_j)$ , to carry out an approximate surface  $z = z(x, y)$ , which consists of polynomial segments. According to the mathematical simulation the animated images were created.*

**Keywords:** task of prosecution, trajectory of the rabbit, fox trajectory, spot basis

### References

1. **Slobodeckij I. Sh., Aslamazov L. G.** Zadachi po fizike. *Bibliotечka "Kvant"*, 1980, vyp. № 5. (in Russian).

2. **Архив** программы "Krolik i Lisa na ploskosti", available at: [http://blagovest2002.narod.ru/files/Fox\\_and\\_Rabbit\\_Sinusoud.rar](http://blagovest2002.narod.ru/files/Fox_and_Rabbit_Sinusoud.rar) (in Russian).

3. **"Krolik" i "Lisa" na ploskosti**, animirovannoe izobrazhenie, available at: <https://www.youtube.com/watch?v=ExIC7n1mlKc> (in Russian).

4. **Traektoriya "Krolika"**, animirovannoe izobrazhenie processa peredvizheniya "Krolika", available at: [http://www.youtube.com/watch?v=Xv\\_q\\_EgdUX4](http://www.youtube.com/watch?v=Xv_q_EgdUX4) (in Russian).

5. **"Krolik" i "Lisa"**, animirovannoe izobrazhenie processa presledovaniya, available at: <https://www.youtube.com/watch?v=dsfqSIZGk8> (in Russian).

6. **Sajt** "Geometricheskoe modelirovanie v sisteme MathCAD". URL: <http://dubanov.exponenta.ru>. Razdel "Stat'ya "Fox and Rabbit" — "Programmy kod MathCAD s kommentariyami", available at: [http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Fox\\_and\\_Rabbit\\_2015.html](http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Fox_and_Rabbit_2015.html) (in Russian).

7. **Sajt** "Geometricheskoe modelirovanie v sisteme MathCAD", available at: <http://dubanov.exponenta.ru>. Arhiv programmy "Fox and Rabbit", available at: [http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox\\_and\\_Rabbit.zip](http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox_and_Rabbit.zip) (in Russian).

8. **Sajt** "Geometricheskoe modelirovanie v sisteme MathCAD", available at: <http://dubanov.exponenta.ru>. Arhiv programmy "Fox and Rabbit", "Lisa" rabotaet na operezhenie, available at: [http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox\\_and\\_Rabbit.zip](http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox_and_Rabbit.zip) (in Russian).

[dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox\\_and\\_Rabbit.zip](http://dubanov.exponenta.ru/2014/Paper/Archive/Fox_and_Rabbit.zip) (in Russian).

9. **Анимированное** изображение, когда "Лиса" работает на опережение. Трехмерный вид, available at: <http://www.youtube.com/watch?v=cerQXgDUwwM> (in Russian).

10. **Анимированное** изображение, когда "Лиса" работает на опережение. Проекция на горизонтальную плоскость, available at: [http://www.youtube.com/watch?v=\\_iQAFGB6iFM](http://www.youtube.com/watch?v=_iQAFGB6iFM) (in Russian).

11. **Понтрягин Л. С.** К теории дифференциальных игр. *Успехи Математических Наук*, 1966, vol. 21, iss. 4 (130), pp. 219–274 (in Russian).

12. **Айзекс Р.** Дифференциальные игры, Moscow, Mir, 1967, pp. 88–117 (in Russian).

13. **Симакова Э. Н.** Об одной дифференциальной игре преследования. *Автоматика и телемеханика*, 1967, iss. 2, pp. 5–14 (in Russian).

14. **Бурдаков С. Ф., Сизов П. А.** Алгоритмы управления движением мобильного робота в задаче преследования. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*, 2014, pp. 49–57 (in Russian).

15. **Желнин Ю. Н.** Линеаризованная задача преследования и уклонения на плоскости, *Ученые записки ЦАГИ*, 1977, pp. 88–97 (in Russian).

16. **Кузьмина Л. И., Осипов Ю. В.** Расчет длины траектории для задачи преследования, *Вестник МГСУ*, 2013, no. 12, pp. 20–26 (in Russian).

# СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ CAD-SYSTEMS

УДК 004.91, 004.92

DOI: 10.17587/it.24.256-265

**В. В. Хабаров**, канд. техн. наук, директор,

Специальное конструкторское бюро автоматизированного проектирования, г. Новосибирск,

**Н. С. Шуталева**, инженер, e-mail: nina.shutaleva@yandex.ru,

**В. И. Костин**, д-р техн. наук, проф., e-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru,

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

## Информационная система проектирования предприятий

*Предложен подход к созданию IT-системы, способной комплексно автоматизировать подготовку поливариантных технико-экономических обоснований модернизации/строительства промышленных предприятий и обеспечить максимально возможную эффективность инвестиций в производство заданной программы изделий с учетом внешних и внутренних условий (ограничений) объектов проектирования.*

**Ключевые слова:** производственное предприятие, информационные технологии проектирования, объектно-ориентированные системы автоматизированного проектирования предприятий, САПР

### Введение

В настоящее время формирование высокотехнологичной, конкурентно способной промышленности, обеспечивающей переход экономики от экспортно-сырьевого типа развития к инновационному типу развития и выходу страны на лидирующие позиции в мире, определяется государством как одна из главных целей промышленной политики. Для достижения цели требуется решение множества задач, в том числе создание новых и модернизация существующих промышленных предприятий.

В масштабах страны и отдельных корпораций решение задачи требует огромных материальных и финансовых ресурсов. Только в оборонно-промышленном комплексе (ОПК) 1700 предприятий нуждаются в модернизации имущественного комплекса, и государство выделяет 3 трлн руб. на замену оборудования. В станкостроении потребность в обновлении оборудования составляет \$1,5...1,8 млрд в год, если ежегодно обновлять 10 % станочного парка. Однако каждое предприятие характеризуется множеством разносторонних конкретных факторов, и проблемы его конкурентоспособности только заменой оборудования НЕ РЕШАЮТСЯ!

При решении указанных задач необходимо рассматривать множество взаимосвязанных параметров, таких как:

- оптимизированная программа выпуска продукции, степень загрузки оборудования, объемы кооперации, себестоимость изделий;
- структура и состав имущественного комплекса;
- рыночные цены на ресурсы производства;
- состав работников, производительность и безопасность труда;
- вредные воздействия на окружающую природную среду и т.д.

Указанные и другие параметры предприятий в их взаимосвязи определяются в процессе подготовки проектов (технико-экономических обоснований — ТЭО) строительства, реконструкции/модернизации. ТЭО (проект) — документ, создание которого предусмотрено Градостроительным кодексом РФ. Состав разделов проекта и требования к их содержанию определены Постановлением Правительства РФ. В ТЭО представляется модель будущего предприятия, и на ее основе принимаются решения об инвестициях в производство новой техники.

Роль подготовки ТЭО в модернизации экономики трудно переоценить. Именно здесь выбираются технологии производства, закладываются материально-технические базы будущих предприятий, определяются объемы капитальных вложений, эксплуатационные расходы и ожидаемая прибыль от инвестиций. Также проектами определяются сроки и методы строительства, кадровый состав объектов проектирования, продолжительности



периодов освоения мощностей, рентабельность и безопасность производства, в конечном итоге — эффективность инвестиций.

Состояние процесса проектирования предприятий в настоящее время характеризуется наличием проблем [1], в совокупности приводящих к созданию **новых** (модернизируемых) предприятий с устаревшими технико-экономическими показателями (ТЭП) и уступающими в конкурентной борьбе зарубежным аналогам.

Создать конкурентоспособное предприятие можно только проектной проработкой нескольких вариантов его устройства. В качестве инструмента для поливариантной подготовки ТЭО и решения основных проблем проектирования предлагается создать информационную систему (технологии) проектирования предприятий (ИСПП).

*Актуальность и востребованность системы* просматривается в нескольких аспектах. ИСПП без увеличения сроков проектирования и численности проектировщиков позволит:

- решать практические задачи вариантного проектирования предприятий на основе их конкретных внешних и внутренних условий, выбирать лучший вариант по технико-экономическим показателям объекта, что обеспечит достижение максимально возможной эффективности инвестиций в строительство (модернизацию) предприятий;
- точно рассчитывать ожидаемую себестоимость продукции;
- обеспечивать снижение материалоемкости, расходов энергии на объектах проектирования и на заводах-изготовителях предметов для оснащения производств;
- сделать существенный шаг в направлении информационного обеспечения жизненного цикла изделий и средств их производства от проекта до сноса предприятия, достигнуть мирового уровня отечественной информационно-технологической продукции в данной области.

В статье представлены основные результаты разработки стадий ИСПП: формирование требований пользователя к системе и концепция создания системы.

## 1. Формирование требований пользователя к ИСПП

Требования разработаны с учетом современных стандартов и анализа опыта, включающего исследование принципов построения автоматизированной системы проектирования предприятий, разработку и многолетнюю эксплуатацию интегрированных САПР "Предприятие" и "ТОПАЗ" [2—5].



Рис. 1. Макроуровневая структура объекта проектирования

### 1.1. Основные положения предметной области.

*Промышленное предприятие* "в наиболее известных альтернативных концепциях рассматривается как: ресурсный процессор; финансовый процессор; ... процессор стратегий" [6], т.е. как экономическая система — объект управления. В качестве объекта проектирования строительства или модернизации предприятие рассматривается как действующий целостный замкнутый физический объект, расположенный на земле и под землей на определенной территории государства, создаваемый для производства продукции, удовлетворяющей потребности других объектов (заказчиков, потребителей) своими функциями, качеством и ценой.

Предприятия в процессе проектирования рассматриваются как элементы структуры, приведенной на рис. 1.

*Внешняя природная среда предприятия* как сущность в проектах описывается данными о состоянии элементов (земля, воздух, водные объекты и население). *Среда, созданная людьми*, является источником многофакторной информации, определяющей цель и ограничения объекта проектирования.

*Продукция предприятия* представляется программой выпуска и конструкторской документацией на изделия.

*Предприятие* рассматривается как детерминированный комплекс производственной и обеспечивающих систем, где доминирующее положение занимает производство. Системы взаимосвязаны логически и физически. Внутренние связи определяются свойствами элементов, обеспечивают целостность и непротиворечивость объекта в целом. Внешние связи предприятия, учитываемые в процессе подготовки ТЭО, осуществляются взаимодействием объектов.

Системный подход к проектированию (построению моделей) предприятий позволяет [7]:

- функционально организовать общий процесс решения проблемы;
- обуславливать параметры системы, которые дают структуру, необходимую для решения проблемы;
- описывать модель системы и ее возможности, что позволяет осуществлять итерацию альтернатив выходов из процесса решения проблемы.



Рис. 2. Схема структуры данных информационной модели объекта проектирования (\* — устроены как сети внутрикорпусные)

Структуру модели предприятия как объекта проектирования можно представить схемой, приведенной на рис. 2.

Процесс проектирования предприятий как объект автоматизации также представляет собой специфичную детерминированную централизованную иерархическую СИСТЕМУ, адекватную объектам проектирования, состоящую из субъектов (персонала), "набора объектов с определенными свойствами и наборов связей" [8].

Цель процесса — создание комплекта документов ПРОЕКТА (ТЭО), предназначенного главным образом для оказания поддержки инвесторам и государственным органам в принятии окончательного решения о целесообразности вложений в производство новой техники. Персонал процесса представляет собой коллективы специалистов с компетенциями по устройству и функционированию частей объекта проектирования.

Объекты процесса включают:

- управление процессом;
- вход процесса — является выходом внешних систем и представляет собой документы (данные), используемые как ограничения, принуждающие к выбору определенных проектных решений. Документы разделяются на условно-постоянные и оперативные. К условно-постоянным документам относятся правила проектирования и каталоги заводов-изготовителей предметов для оснащения предприятий. Оперативные документы по каждому объекту включают: контракт (содержит основные ограничения по срокам проектирования и объему финансирования); задание на проектирование

и установленный набор документов, содержащих исходные данные;

- выход процесса — представляет собой модель будущего предприятия в форме расчетов, текстов, чертежей (карт) и смет. Выход становится входом для "родной" системы при проектировании реконструкции (модернизации) объекта и входом для внешних систем (процессов экспертизы проекта, строительства и эксплуатации объекта);
- методы процесса подготовки ТЭО — представляют собой процедуры преобразования информации входа в выход, включают анализ входной информации, ее преобразование, накопление и перемещение внутри разделов и между разделами проекта. Процедуры выполняются в определенной последовательности и закономерно циклично повторяются в процессе подготовки ТЭО каждого объекта проектирования;
- время процесса проектирования одного объекта (обычно от 3 месяцев до 1 года);
- бюджет процесса, определяемый расчетом и согласовываемый с Заказчиком;
- среду, в которой осуществляется процесс — проектная организация. Подразделения организации (отделы) выполняют специализированные проектные операции по формированию частей модели объекта проектирования. Взаимодействие между персоналом внутри каждого подразделения и между смежными подразделениями осуществляется через внутренние связи проектной организации. Виды связи включают устное общение и внутрен-



Рис. 3. Схема организационной структуры типичной проектной организации

ний документооборот (обмен заданиями и взаимные согласования).

Схема организационной структуры типичной проектной организации представлена на рис. 3.

Внешние связи проектной организации устанавливаются со следующими объектами внешней среды, созданной людьми:

- органы государственной федеральной власти и субъектов РФ, определяющие нормы и правила проектирования и эксплуатации объектов;
- саморегулируемые организации (СРО), выдающие свидетельства о допуске к выполнению проектных работ;
- заказчики проектной документации (инвесторы) — предприятия различных форм собственности;
- территориальные органы управления поставщиков услуг и энергоресурсов для объектов проектирования (топлива, тепловой и электрической энергии, средств связи, воды и канализации);
- поставщики научно-технической информации: издательства технической литературы и номенклатурных каталогов, включающих характеристики оборудования, приборов, аксессуаров, труб, кабельной продукции и строительных материалов;
- НИИ и КБ — разработчики новых изделий и технологий, предлагаемых к использованию на объектах проектирования;
- заводы-изготовители средств производства, строительных изделий и материалов.

**1.2. Потенциальные пользователи ИСПП.** Это специалисты проектных организаций. В каче-

стве причастных к ИСПП организаций должны рассматриваться поставщики исходной и потребители результирующей информации.

**1.3. Требования пользователей к системе.** Требования к системе в целом:

- ИСПП должна создаваться как сложная детерминированная многоуровневая, многофункциональная и многопользовательская (до ~ 100 одновременных пользователей) динамическая автоматизированная система;
- система должна быть ограничена функциями процесса разработки проекта (ТЭО) строительства (модернизации) объекта проектирования, но иметь возможности для дальнейшего развития в направлениях решения задач причастных организаций;
- система должна позволять пользователям создавать разнообразные варианты проектных решений и оказывать поддержку при выборе лучшего варианта;
- система должна функционировать в проектных организациях в режиме реального времени, использовать технические средства серийного производства, объединенные в корпоративные вычислительные сети, связанные с внешними объектами через сеть Интернет.

**Требования к функциям системы.** ИСПП должна решить основные проблемы традиционного проектирования.

Первая проблема — разработка интерфейса передачи первичной исходной информации об изделиях от НИИ и КБ проектным институтам в электронном структурированном виде. Такой интерфейс позволит автоматизировать обработ-

ку исходных данных об изделиях и, главное, исключить излишние коэффициенты запаса при определении требуемой производительности оборудования, снизить пиковые нагрузки на обеспечивающие инженерные подсистемы. Это означает снижение материало- и энергоемкости производства, снижение капитальных и эксплуатационных расходов. Исключение из проектов предприятий излишних мощностей, кадров, площадей позволит снизить себестоимость продукции и повысить эффективность эксплуатации построенного объекта.

Вторая проблема состоит в создании базы данных нормативно-справочной информации в объектно-ориентированном виде и базы данных информации о предметах, доступных для оснащения имущественного комплекса объекта проектирования. Это обеспечит автоматический поиск, копирование данных из нормативно-справочных баз в базу данных объекта проектирования, следовательно, приведет к исключению проектных ошибок и сокращению сроков выполнения проектных процедур. Автоматизация поиска и выбор по точно рассчитанным критериям из базы данных нескольких *вариантов подходящих моделей* оборудования обеспечит уверенность проектировщиков и заказчиков проекта в том, что рассмотрены все или большинство возможных разумных вариантов комплектации объекта и выбраны лучшие.

Третья проблема — переход к вариантному проектированию на основе создания базы данных объекта проектирования (БД ОП), где по мере выполнения проектных процедур будет постепенно накапливаться информация, отобража-

ющая состояние модели объекта проектирования на конкретный момент времени. "Модели — это больше чем аналоги: они предназначены для того, чтобы вскрыть основные элементы структуры изучаемой системы" [8].

Универсальная структура объекта проектирования должна формироваться автоматически. Уникальность (разнообразие) каждого из проектируемых объектов будет определяться номенклатурой выпускаемой продукции, составом материалов, принятыми технологиями и выбранным оборудованием рабочих мест, потребностями производства в ресурсах, климатическими характеристиками места расположения предприятия на территории РФ и т.д. Причем каждый из параметров может быть представлен несколькими вариантами.

**Требования к структуре.** ИСПП на содержательном уровне представляется структурой из трех основных систем:

- 1) Центр управления проектированием (ЦУП);
- 2) База данных "Объекты проектирования" (БД ОП);
- 3) Процесс проектирования в следующем составе:

- база данных о материальных предметах, имеющих на рынке, доступных для оснащения ОП (БД ПРЕДМЕТЫ);
- база данных "Нормы и правила" проектирования (БД НОРМЫ);
- база данных о персонале проектной организации (БД КАДРЫ);
- база данных ОП, завершающихся проектированием (БД АРХИВ);
- методы автоматизированного проектирования (Библиотека программных приложений для решения проектных задач и документации на систему).

**Требования к видам обеспечения.**

**Методическое обеспечение** должно создаваться на стадии технического проекта по каждой функциональной подсистеме в форме документов, содержащих перечень проектных процедур, их последовательность и "описание *i*-й процедуры". Каждое "описание" должно состоять из аннотации, постановки задачи (цель, формы входных и выходных данных, метод выполнения и схема алгоритма). Также должны быть приведены: термины, нормативные и справочные данные в табличных формах с указанием форматов данных.

**Информационное обеспечение** также должно входить в состав технического проекта, разрабатываться на основе методического и включать

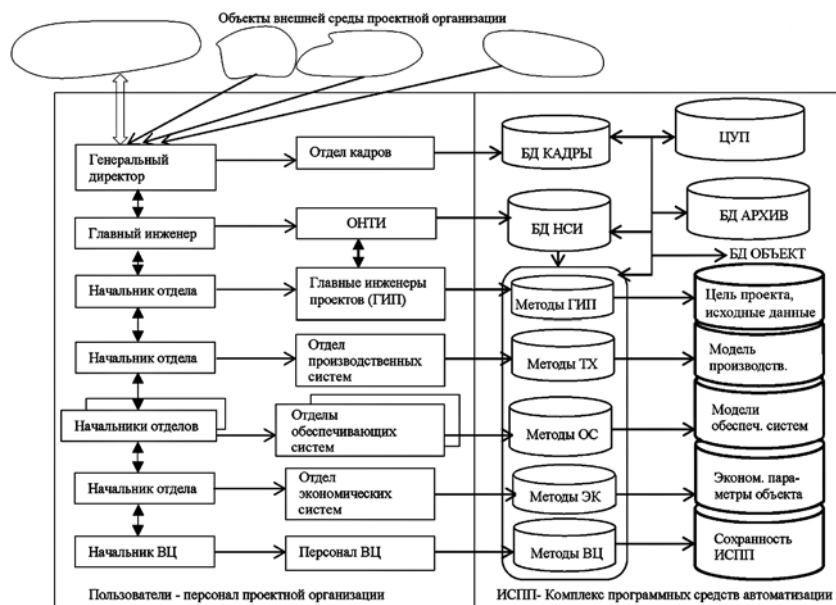


Рис. 4. Структурно-функциональная схема ИСПП

описания схем данных, исходные массивы данных в табличном виде и в виде банков данных.

*Программное обеспечение ИСПП* должно состоять из общесистемного и прикладного. Требования к общесистемному обеспечению (операционная система, языки программирования, СУБД) должны быть сформулированы на стадии разработки технического задания. Прикладное программное обеспечение должно состоять из адаптированных внешних программных комплексов и собственных, разработанных на основе операционных описаний.

**Требование к функционированию системы.** ИСПП должна представлять собой "человеко-машинную" систему, выполняющую определенные функции процесса формирования электронной базы данных модели предприятия и процесса визуализации модели в форме установленных документов ПРОЕКТА (ТЭО) *при минимально возможном числе диалоговых процедур.* Схема функционирования ИСПП в составе организации-пользователя как взаимодействие основных частей показана на рис. 4.

## 2. Основные положения концепции системы

При создании ИСПП, в математическом смысле, предстоит иметь дело с решением обратной задачи, которая формулируется следующим образом. Известно, какой должна быть Система в будущем, необходимо определить совокупность причин, которые приведут к требуемому следствию, т. е. определить задачи и последовательность их решения.

Иными словами можно сказать: с учетом требований в общих чертах понятно, ЧТО предстоит создать, необходимо определить — КАК и КАКИЕ РЕСУРСЫ для этого потребуются.

Рассмотрим основные функциональные системы: *базу данных модели объекта проектирования (БД ОП) и процесс ее формирования.*

**2.1. Теоретическая основа разработки БД ОП.** Она состоит в следующем. Предприятие создается, прежде всего, как производственно-технологическая система и характеризуется множеством элементов с присущими им свойствами, которые можно объединить в конечное число параметров:

$$П = (N, T, R, O, M, S, F, E, D, \tau),$$

где  $N$  — параметр, определяемый внешней системой и задающий цель объекта проектирования в виде номенклатуры и числа планируемых к выпуску изделий;

$T$  — параметр, характеризующий технологии (виды работ) и трудоемкость изготовления изделий;

$R$  — параметр, характеризующий число и кадровый состав персонала;

$O$  — оборудование. Параметр характеризует групповой состав и количество оборудования, необходимого для осуществления технологии производства;

$M$  — материалы (основные и вспомогательные) — предметы труда на разных стадиях преобразования в изделия (сырье, полуфабрикаты, узлы, блоки, изделия);

$S$  — параметр геометрический, характеризующий положение в пространстве материальных элементов системы (координаты и площади (объемы) территории предприятия, корпусов, цехов, участков и т.д.);

$F$  — параметр, характеризующий подсистемы, обеспечивающие потребности производственной системы в специальной организации пространства (генеральный план предприятия, строительная система), в системах инженерного оборудования корпусов и наружных сетях, в мероприятиях предотвращения чрезвычайных ситуаций;

$E$  — параметр характеризующий производственную систему с точки зрения ее влияния на изменения состояния — загрязнения компонентов окружающей среды (атмосферного воздуха, водных объектов, земли);

$D$  — деньги, параметр, характеризующий потребности систем объекта проектирования в капитальных вложениях (сметы) и эксплуатационных расходах;

$\tau$  — время. Параметр, определяющий сроки службы материальных элементов систем, сроки строительства и освоения мощностей, срок окупаемости инвестиций и т.д.

Опыт показал, что для организации параметров может успешно использоваться традиционная структура производственной системы, приведенная на рис. 5.

Каждый цех определяется совокупностью параметров  $n$ -го цеха (аналогично уровню предприятия):

$$П_{ц} = \{N_{ц}, M_{ц}, T_{ц}, O_{ц}, R_{ц}, S_{ц}, F_{ц}, E_{ц}, D_{ц}, \tau_{ц}\}.$$

Следующий уровень системы — "участок" — характеризуется параметрами:

$$П_{у} = \{N_{у}, M_{у}, T_{у}, O_{у}, R_{у}, S_{у}, F_{у}, E_{у}, D_{у}, \tau_{у}\}.$$

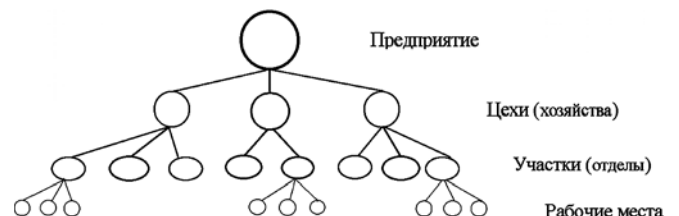


Рис. 5. Структура производственной системы предприятия

Уровень "рабочих мест" характеризуется параметрами:

$$= \{N_{\text{рм}}, M_{\text{рм}}, T_{\text{рм}}, O_{\text{рм}}, R_{\text{рм}}, S_{\text{рм}}, F_{\text{рм}}, E_{\text{рм}}, D_{\text{рм}}, \tau_{\text{рм}}\}.$$

Таким образом, многоуровневая иерархическая структура производственной системы, где переменные всех уровней имеют однородный характер, в совокупности отображает модель объекта.

Инженерные системы, обеспечивающие рабочие места подводом и отводом различных сред, характеризуются собственными универсальными структурами и аналогичными переменными параметрами: производительностью, пропускной способностью (V), оборудованием (O), материалами (M), обслуживающим персоналом (R), занимаемым пространством (S), потребностью в ресурсах (T), капитальными и эксплуатационными расходами (D), сроком службы и временем на строительные-монтажные работы ( $\tau$ ).

Обеспечение помещениями производственной и подчиненных ей инженерных систем осуществляется строительной системой. Каждый корпус/сооружение также характеризуется универсальной иерархической строительной структурой, элементы которой определяются в условиях множества ограничений со стороны внутренних и внешних систем (инженерно-геологических и геофизических условий земельного участка предприятия, климатических условий, норм и правил).

В структуре модели объекта между элементами производственной системы и элементами обеспечивающих систем должны быть установлены логические и физические, прямые (возбуждение) и обратные (реакции) связи. Связи реализуются через свойства элементов на всех уровнях структур и обеспечивают единство, целостность и непротиворечивость частей объекта проектирования.

Свойства элементов должны определяться программными приложениями, подсистемой *Методы* автоматизированного проектирования.

Подсистема *Методы* (библиотека программных приложений процесса) должна обеспечить одновременное последовательно-параллельное формирование и визуализацию частей структуры базы данных модели объекта. При разработке методов следует иметь в виду, что в каждой части проекта решаются схожие по смыслу задачи:

- получение и контроль внешних и внутренних исходных данных;
- первичная обработка исходных данных (расчеты с использованием БД НОРМЫ) в целях определения критериев для выбора структурных элементов  $i$ -й части объекта;
- формирование вариантов принципиальных схем устройства  $i$ -й части объекта на основании исходных и расчетных данных;

- выбор по рассчитанным критериям из БД ПРЕДМЕТЫ подходящих вариантов оборудования и запись результатов выбора в БД ОП;
- определение параметров требуемых помещений и ресурсов обеспечивающих смежных систем (подготовка и выдача заданий);
- выбор мест расположения оборудования, трасс сетей для перемещения предметов труда и различных сред (энергии, жидкостей, газов);
- формирование расчетных схем сетей и автоматическое выполнение соответствующих расчетов с одновременным выбором средств перемещения и устройств — преобразователей транспортируемых сред;
- графические работы (изготовление чертежей);
- согласование частей объекта по принципу "каждый с каждым";
- оценка вариантов модели будущего предприятия с точки зрения его воздействия на объекты окружающей среды;
- расчет сметной стоимости и технико-экономических показателей объекта проектирования;
- документирование;
- сдача в БД АРХИВ электронной модели объекта и документов.

## 2.2. Задачи процесса разработки ИСПП и последовательность их решения.

Первая задача (организационная) — создание среды. Под средой понимается специальная организация или подразделение, нацеленное на разработку и длительный (десятилетия) жизненный цикл эксплуатации и сопровождения системы. Организация должна иметь основной персонал высокой квалификации, специальную технологию и новейшие средства производства ИТ-продукции.

*Основной персонал* — управленцы; инженеры-проектировщики с компетенциями в предметных областях объекта проектирования; программисты с компетенциями в областях создания банков данных и разработки объектно-ориентированных программных приложений; персонал для обеспечения надежной работы вычислительной техники.

*Технология производства ИТ-систем*, применяемая в настоящее время, подробно описана в литературе, например в [9], где авторы признают, что первая версия программного продукта, созданная по распространенной и описанной в их книге технологии, "никогда не является полностью приемлемой для использования Заказчиком". ИСПП предлагается создавать по иной технологии, ранее использованной при разработке больших САПР "Предприятие" и "ТОПАЗ".

Суть в том, что в составе организации-разработчика создаются две команды: из программистов и опытных инженеров предметной области, обязательно прошедших подготовку на курсах программистов. Такие команды объединяются



Рис. 6. Схема ориентировочной структуры организации-разработчика ИСПП

общей целью, финансированием, единым руководством, хорошим взаимопониманием и строгой дисциплиной. Они на основе понимания идеи, собственных компетенций и быстрого обследования объектов и процесса проектирования предприятий *i*-й отрасли способны доработать требования к планируемому программному продукту, подготовить техническое задание, операционные описания и алгоритмы автоматизируемых процессов, создать банки данных, написать и отладить программные приложения. Наличие проектировщиков в команде разработчиков позволяет тестировать программные модули (по мере готовности), проводить опытную эксплуатацию частей и системы в целом на реальных объектах заказчика, не привлекая его специалистов. В результате на выходе получается продукт, готовый к использованию. Далее происходит реорганизация персонала разработчика, формируются новые команды, нацеленные:

- на *проектирование* предприятий с использованием ИСПП и поддержание баз данных НОРМЫ и ПРЕДМЕТЫ в актуальном состоянии;
- на *сбыт*, обучение пользователей и сервисное сопровождение программной системы у покупателей;
- на *разработку новых версий СИСТЕМЫ*.

Специалисты вновь созданных команд в процессе практической работы отслеживают изменения во внешней среде, выявляют несовершенство продукта, периодически формируют новые требования к СИСТЕМЕ, обеспечивают ее инновационное развитие и удлиняют срок жизни. Структура организации на стадии разработки ИСПП представлена на рис. 6.

## Заключение

Проектные организации и результаты их деятельности в виде проектов (ТЭО) в настоящее время воспринимаются обществом как объекты строительного рынка. Но этап строительства является проходящим в жизненном цикле предприятия, а создаваемые в *точном* соответствии с проектами производственные мощности на десятки лет определяют прогресс или проблемы отечественной экономики. Предлагаемый способ автоматизации подготовки ТЭО производства новой техники может изменить существующее положение. ИСПП, как современная аналитическая система с элементами искусственного интеллекта, будет способна *автоматически* анализировать исходные данные, оценивать результаты расчетов, принимать стандартные проектные решения и оказывать поддержку пользователям в решении задач, сложных для формализации.

Направление и прогнозируемый объем практического использования ИСПП в реальном секторе экономики предполагается организацией-разработчиком, внешними пользователями и причастными организациями. Организация-разработчик сможет использовать ИСПП по следующим направлениям:

- как инструмент подготовки многовариантных ТЭО строительства или модернизации предприятий по контрактам с Заказчиками (инвесторами);
- оказание услуг по созданию и сопровождению банков данных цифровых моделей производства действующим предприятиям;

- предоставление данных информационно-справочной системы ИСПП внешним организациям;
- реализация ИСПП на IT-рынке, включая обучение и проведение семинаров пользователей.

Причастные организации смогут использовать в своей деятельности результаты работы ИСПП при создании безбумажного документооборота. Также электронные модели предприятий позволят автоматизировать задачи оценки потенциальных и избыточных мощностей, формирования производственных программ загрузки избыточных мощностей на основе технико-экономических обоснований.

Масштаб (потенциальный объем) внедрения ИСПП можно ориентировочно оценить, опираясь на ФЦП "Развитие оборонно-промышленного комплекса до 2020 года", где предусматривается 3 трлн руб. прямых инвестиций на глубокую модернизацию 1700 предприятий ОПК. Использование такой системы, как ИСПП, обеспечивающей снижение капитальных затрат (как минимум на 5...10 %), могло бы принести бюджету РФ экономию в 150...300 млрд руб.

Тысячи отечественных предприятий (1700 предприятий ОПК, ~ 7000 предприятий в машиностроении) нуждаются в реконструкции, значит, нуждаются в ТЭО, гарантирующих максимально возможную эффективность инвестиций.

Создание ИСПП можно рассматривать как инновационный проект. Опыт внедрения ранее созданной САПР "Предприятие (СУППОРТ)" показал: сметная стоимость производственно-технологической системы первого реального объекта *в разы меньше* сметной стоимости проекта, выполненного по традиционной технологии. Полученная экономия с лихвой окупила все затраты на разработку программных средств. Также опыт реализации на рынке САПР таких подсистем предприятий, как <Вентиляция>, <Водоснабжение>, <Канализация>, показал, что проектирование обеспечивающих систем предприятия практически инвариантно по отношению к видам производств. Спектр пользователей можно представить по таким покупателям, как Новолипецкий металлургический комбинат, Уралвагонзавод, АВТОВАЗ, Новороссийский порт, Новороссийский ГРАЖДАНПРОЕКТ, ТюменНИИГИПРОГАЗ, Метропроект, Дальрыбпром и др.

*Потенциал развития ИСПП* представляется возможным в нескольких направлениях: создание программных приложений для поддержки проек-

тирования цехов вновь возникающих технологий; создание программных интерфейсов в линии <Разработчик изделий> → <ИСПП> → <Строительство> → <технологическая подготовка производства> → ERP-системы. ИСПП сможет предоставлять данные разрабатываемой в настоящее время Государственной информационной системе промышленности (ГИСП).

Материалы технического отчета "Формирование требований пользователя к системе" и "Концепция" могут быть полезны руководителям и специалистам предприятий при разработке технического задания, компонентов информационно-методического обеспечения ИСПП и при создании современных безбумажных технологий производства изделий.

#### Список литературы

1. Гранев В. В. Современное проектирование: проблемы и перспективы. // АВОК. 2016. Т. 7. С. 4—10.
2. Хабаров В. В., Чистяков В. Л. Система автоматизированного проектирования промышленных предприятий (САПР СУППОРТ) // ВНИИ НТПИ Научно-технический симпозиум ярмарки научно-технических достижений в строительстве НТД-89 (тезисы докладов, выступлений). 1990. С. 230.
3. Шуталева Н. С. Автоматизированное проектирование систем обеспечения промышленного предприятия // ВНИИ НТПИ Научно-технический симпозиум ярмарки научно-технических достижений в строительстве НТД-89 (тезисы докладов, выступлений). 1990. С. 231—232.
4. Чистяков В. Л., Присмотров А. П. Диалоговая естественно-языковая мониторинговая система общего назначения (ДЕМОН) // ВНИИ НТПИ Научно-технический симпозиум ярмарки научно-технических достижений в строительстве НТД-89 (тезисы докладов, выступлений). 1990. С. 233—234.
5. Зверев С. А. Формирование модели корпуса и изготовление чертежей планов его этажей // ВНИИ НТПИ Научно-технический симпозиум ярмарки научно-технических достижений в строительстве НТД-89 (тезисы докладов, выступлений). 1990. С. 235—236.
6. Клейнер Г. Б. Стратегия предприятия. М.: ДЕЛО, 2008. С. 170—171.
7. Оптнер С. Л. Системный анализ для решения проблем бизнеса и промышленности: Пер. с англ. М.: Концепт, 2006. С. 206.
8. Стаффорд Бир. Мозг фирмы: Пер. с англ. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. С. 416.
9. Фатрелл Р. Т., Шафер Д. Ф., Шафер Л. И. Управление программными проектами: Достижение оптимального качества при минимуме затрат. М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. С. 1125.



**V. V. Habarov**, Ph. D., Director,

Special computer-aided design Bureau, Novosibirsk, Russian,

**N. S. Shutaleva**, Engineer, e-mail: nina.shutaleva@yandex.ru,

**V. I. Kostin**, D. Sc., Professor, e-mail: izvuz\_str@sibstrin.ru,

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian

## Information System for Design Enterprises

*The article is devoted to the task of ensuring the largest possible efficiency of investments in the production of the set product program factored in external and internal conditions (limitations) of the enterprises. The legal document containing the specified parameters which determine efficiency is a project. The current state of the project preparation process does not allow during the acceptable time to carry out multivariant design of enterprises and choose the most effective version. It is suggested an approach to create IT system capable to provide multivariant design of enterprises based on complex automation of database creation for object model design. The technical report "Formation of the user requirements to the system" and the concepts of the system were developed. The suggested IT system as a tool for the technical and economic assessment of construction / reconstruction of production facilities will allow in admissible time without an increase in the number of designers to create several reasonable variants of the model for design object, to compare the variants according to their effectiveness and choose the best one. Creation of the system will be a significant step in the directions of information support of products life cycle and their means of production, and achieving the world level of domestic information products in this area. The work was done factored in modern standards and technical capabilities, long experience of creation and development of the CAD "Enterprise".*

**Keywords:** production facility, information design technologies, object-oriented systems of computer assisted enterprise design, CAD.

### References

1. **Granjov V. V.** *Sovremennoe proektirovanie: problemy i perspektivy* (Modern design: problems and prospects), AVOK, 2016, no. 7, pp. 4–10 (in Russian).
2. **Habarov V. V., Chistjakov V. L.** *Sistema avtomatizirovanogo proektirovanija promyshlennyh predpriyatij* (SAPR SUPPORT) (CAD of industrial enterprises/ CAD SUPPORT), *VNII NTPI Nauchno-tehnicheskij simpozium jarmarki nauchno-tehnicheskikh dostizhenij v stroitel'stve NTD-89 (tezisy dokladov, vystuplenij)*, 1990, p. 230 (in Russian).
3. **Shutaleva N. S.** *Avtomatizirovannoe proektirovanie sistem obespechenija promyshlennogo predpriyatija* (CAD engineering of industrial enterprises), *VNII NTPI Nauchno-tehnicheskij simpozium jarmarki nauchno-tehnicheskikh dostizhenij v stroitel'stve NTD-89 (tezisy dokladov, vystuplenij)*, 1990, pp. 231–232 (in Russian).
4. **Chistjakov V. L., Prismotrov A. P.** *Dialogovaja estestvenno-jazykovaja moni- tornaja sistema obshhego naznachenija* (Dialogue natural language monitoring system (DEMON)), *VNII NTPI Nauchno-tehnicheskij simpozium jarmarki nauchno-tehnicheskikh dostizhenij v stroitel'stve NTD-89 (tezisy dokladov, vystuplenij)*, 1990, pp. 233–234 (in Russian).
5. **Zverev S. A.** *Formirovanie modeli korpusa i izgotovlenie chertezhej planov ego jetazhej* (The forming of the building model and drawing plans of its floors)", *VNII NTPI Nauchno-tehnicheskij simpozium jarmarki nauchno-tehnicheskikh dostizhenij v stroitel'stve NTD-89 (tezisy dokladov, vystuplenij)*, 1990, pp. 235–236 (in Russian).
6. **Klejner G. B.** *Strategija predpriyatija* (Enterprises strategy), Moscow, DELO, 2008, pp. 170–171 (in Russian).
7. **Optner S. L.** *Sistemnyj analiz dlja reshenija problem biznesa i pro-myshlennosti* (System analysis for business and industrial problem solving), Moscow, Koncept, 2006, 206 p. (in Russian).
8. **Stafford Bir.** *Mozgfirmy* (Brain of the firm), Moscow, Knizhnyj dom "LIBROKOM", 2009, 416 p. (in Russian).
9. **Fatrell R. T., Shafer D. F., Shafer L. I.** *Upravlenie programnymi projektami*. (Quality software project management), Moscow, Publishing house "Vil'jams", 2003, 1125 p. (in Russian).

**В. И. Васильев**, д-р техн. наук, проф., e-mail: vasilyev@ugatu.ac.ru,  
**А. М. Вульфин**, канд. техн. наук, доц., e-mail: vulfin.alexey@gmail.com,  
**М. Б. Гузаиров**, д-р техн. наук, проф., e-mail: guzairov@ugatu.su,  
Уфимский государственный авиационный технический университет

### Оценка рисков информационной безопасности с использованием нечетких продукционных когнитивных карт<sup>1</sup>

*Дана краткая характеристика современных подходов к анализу рисков информационной безопасности, связанных с качественной и количественной оценкой рисков. Отмечаются преимущества использования для этих целей нечетких когнитивных карт, обладающих, помимо своей наглядности и удобства восприятия, возможностью моделирования плохо формализуемых ситуаций и систем в условиях неопределенности, что является одним из основных препятствий при решении задач защиты информации.*

*Перечислены основные классы нечетких когнитивных карт, а также проблемы, возникающие при их построении и применении для решения задач анализа и управления информационными рисками. Приводятся обоснования в пользу выбора нечетких продукционных когнитивных карт. Даны базовые понятия и определения, лежащие в основе построения данного класса нечетких когнитивных карт. Рассмотрены характерные этапы процедуры оценки информационных рисков с использованием нечетких продукционных когнитивных карт. На примере оценки последствий от реализации вирусной атаки на информационный ресурс, размещенный на рабочей станции (АРМ оператора), анализируются особенности решения данной задачи с помощью таких карт. Обсуждается задача оптимального (рационального) выбора контрмер, имеющих своей целью уменьшение (или снижение до некоторого допустимого уровня) возможного ущерба от воздействия угрозы.*

**Ключевые слова:** информационная безопасность, анализ и управление риском, когнитивное моделирование, нечеткая продукционная когнитивная карта, оценка риска, контрмеры по защите информации

#### Введение

Проблема обеспечения информационной безопасности приобретает в последние годы все большую остроту. Следствием этого является повышенное внимание общества и государства к созданию нормативной и законодательной базы, регламентирующей основные вопросы проведения аудита и оценки защищенности информационных систем, разработки, внедрения и эксплуатации систем защиты информации, успешно противодействующих возможному внешним и внутренним угрозам. За последние 10—15 лет создана обширная система национальных стандартов информационной безопасности (ГОСТ Р ИСО / МЭК 15408, 27001 — 27005, 15335, 18405, СТО БР ИББС и др.), в той или иной мере охватывающих общие вопросы анализа и управления информационными рисками.

Существует достаточно большое число методов и алгоритмов, позволяющих получить оценку уровня риска с последующим формированием рекомендаций по выбору необходимых мер защиты информации [1, 2]. Методы, предназначенные для качественной оценки рисков (такие, как метод экспертных оценок или схема нечеткого логического вывода), базируются на неполной исходной информации и дают общую, предварительную оценку уровня защищенности системы. Методы, основанные на количественной оценке рисков (например, методы ситуационного анализа, марковские модели, нейронные сети и др.), требуют для своего использования более полной информации об исследуемой системе и позволяют прогнозировать не только уровень риска, но и ожидаемый потенциальный ущерб от действия угроз, что может явиться базой для принятия более обоснованных решений по снижению уровня риска.

Важное место среди методов, направленных на получение качественной оценки рисков, за-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-48-020095.

нимают методы когнитивного моделирования, предназначенные для исследования плохо формализуемых ситуаций и проблем путем построения нечетких когнитивных карт (Fuzzy Cognitive Maps, FCM) [3–5]. Нечеткие когнитивные карты (НKK) впервые были предложены Б. Коско в 1986 г. в его широко известной работе [6]. Сегодня данный класс моделей существенно расширился и включает в себя обобщенные НKK [7, 8], реляционные НKK [5, 9], интервальные ("серые") НKK [4, 5], продукционные НKK [10, 11], НKK в базе "истина—ложь—неопределенность" [12] и многие другие модификации НKK [4, 5, 13]. Можно указать достаточно большое число примеров успешного применения НKK для решения задач анализа и управления информационными рисками [14–18]. В основе построения этих моделей оценки рисков используется так называемая трехфакторная формула риска:

$$\text{Риск} = \text{Угроза} * \text{Уязвимость} * \text{Ценность ресурса}, \quad (1)$$

характеризующая происхождение и основные составляющие формирования риска. В данной работе рассмотрены особенности применения одного из перспективных классов когнитивных моделей — нечетких продукционных когнитивных карт для оценки рисков информационной безопасности. Основное внимание уделено методологическим аспектам решения данной задачи с выделением тех сложностей и узловых моментов, с которыми встречается технология когнитивного моделирования.

## 1. Нечеткие продукционные когнитивные карты

Нечеткие продукционные когнитивные карты (НПКК), или нечеткие когнитивные карты, основанные на правилах (*Rule Based Fuzzy Cognitive Maps*), впервые предложенные в 1999 г. Х. Карвалло и Х. Томе [10], привлекают внимание многих исследователей в силу ряда своих несомненных преимуществ. Во-первых, они представляют собой действительно нечеткие системы, позволяющие описать качественное поведение сложных систем и их компонентов с помощью системы нечетких правил; во-вторых, они обладают значительной общностью, допуская использование различных видов нечетких связей (отношений), включая обратные связи, между входящими в их состав концептами; в-третьих, они учитывают фактор времени, позволяя моделировать динамику сложных, плохо формализуемых систем.

Под *нечеткой продукционной когнитивной картой* обычно понимается ориентированный граф (орграф), задаваемый парой множеств:

$$K = \{C, F\}, \quad (2)$$

где  $C = \{C_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) — множество узлов (вершин) орграфа, называемых *концептами*;  $F = \{F_{ij}\}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ) — множество дуг — связей (отношений) между концептами;  $n$  — число концептов НПКК. Предполагается, что переменная состояния  $X_i$  каждого концепта  $C_i$  рассматривается как лингвистическая переменная, принимающая значения из некоторого нечеткого терм-множества  $\{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{im}\}$ , подмножества (термы) которого  $T_{ik}$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ), в свою очередь, задаются функциями принадлежности:  $T_{ik} = \{\mu_{ik}(X_i), X_i\}$ ,  $\mu_{ik}: X_i \rightarrow [0, 1]$ , где  $X_i \in [0, 1]$  или  $X_i \in [-1, 1]$ . Различают два вида концептов: *уровни* (levels), которые представляют абсолютные значения состояния концепта в данный момент времени, и *вариации* (variations), которые представляют изменения состояния концепта по отношению к предыдущему моменту времени. Последнее важно для описания динамики поведения исследуемых систем. Для определения взаимного влияния концептов ( $C_i \rightarrow C_j$ ) используются нечеткие продукционные правила, позволяющие представить предпосылки (условия) и заключения нечетких правил на основе нечетких множеств.

На рис. 1 приведен пример задания нечетких правил для определения влияния концепта  $C_i$  на концепт  $C_j$ .

Предполагается, что переменные  $X_i$  и  $X_j$ , характеризующие состояния концептов  $C_i$  и  $C_j$ , могут принимать значения из терм-множества {Очень\_высокая (VH), Высокая (H), Средняя (M), Низкая (L), Очень\_низкая (VL)}, задаваемые с помощью соответствующих функций принадлежности. Для реализации процедуры нечеткого логического вывода (применительно к конкретному "четкому" значению входной переменной  $X_i^*$  и получению "четкого" значения переменной  $X_j^*$  на выходе)

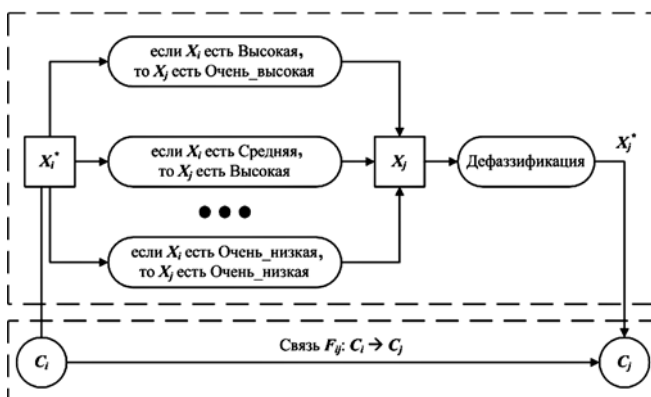


Рис. 1. Пример влияния концепта  $C_i$  на концепт  $C_j$  в НПКК

можно воспользоваться алгоритмом Мамдани [19]. Особенность реализации вычислительного процесса в данном случае состоит в выполнении последовательных преобразований (четкое значение  $X_i^* \rightarrow$  фаззификация  $\rightarrow$  нечеткий логический вывод  $\rightarrow$  получение нечеткого множества для  $X_j \rightarrow$  дефаззификация, вычисление четкого значения  $X_j^*$ ) и т.д. для каждой последующей пары концептов  $C_j \rightarrow C_{j+1} \rightarrow \dots$  на пути следования в НПКК. На этапе дефаззификации (приведения к четкости) выходной переменной  $X_j$  используется метод взвешенного среднего:

$$X_j^* = \frac{\sum_{l=1}^m \alpha_l X_{jl}^o}{\sum_{l=1}^m \alpha_l}, \quad (3)$$

где  $X_j^*$  — дефаззифицированное значение переменной состояния концепта  $C_j$ ;  $X_{jl}^o$  ( $l = 1, 2, \dots, m$ ) — центральные значения нечетких подмножеств (термов) переменной  $X_j$ ;  $\alpha_l$  — уровень активности  $l$ -го правила, соответствующий конкретному значению входной переменной  $X_i^*$ ;  $m$  — число термов (подмножеств) лингвистической переменной  $X_j$  (в примере  $m = 5$ ).

В общем случае, если на концепт  $C_j$  оказывают непосредственное влияние  $k$  предшествующих концептов  $C_i, C_{i+1}, \dots, C_{i+k-1}$ , то нечеткие продукционные правила принимают более сложный вид, например:

П<sub>1</sub>: если  $X_i$  есть Высокая и  $X_{i+1}$  есть Высокая и ... и  $X_{i+k-1}$  есть Высокая, то  $X_j$  есть Очень\_высокая;

П<sub>N</sub>: если  $X_i$  есть Очень\_низкая и  $X_{i+1}$  есть Очень\_низкая и ... и  $X_{i+k-1}$  есть Очень\_низкая, то  $X_j$  есть Очень\_низкая;

Процедура нечеткого логического вывода здесь реализуется аналогично. Для выполнения операции логического И можно воспользоваться оператором MIN.

Основной недостаток НПКК — резкое возрастание числа продукционных правил при возрастании числа концептов. Так, в предыдущем примере для определения состояния одного концепта  $C_j$  (переменной  $X_j$ ) при двух предшествующих взаимодействующих с ним концептах  $C_i, C_{i+1}$ , описываемых соответственно переменными состояниями  $X_i$  и  $X_{i+1}$ , имеем  $k = 2, m = 5$ , а общее число указанных выше правил равно  $m^2 = 25$ . Конечно, не все эти правила будут активными (т. е.  $\alpha_l \neq 0$ ) для конкретных "четких" значений входов  $X_i^*$  и  $X_{i+1}^*$ , поступающих с выходов концептов  $C_i$  и  $C_{i+1}$ . Более того, всегда активизируются лишь четыре правила, остальные правила

не срабатывают. Тем не менее проблема высокой размерности базы правил НПКК остается и, вообще говоря, для ее решения необходимо применять специальные методы и способы [20].

## 2. Методика оценки риска с помощью НПКК (пример применения)

Допустим, что требуется оценить риск от возможного воздействия вирусной атаки на некоторый информационный ресурс, размещаемый на сервере, рассматривая в качестве уязвимости отсутствие обновлений антивирусного ПО.

Возвращаясь к упомянутой выше трехфакторной формуле риска (1), представим соответствующую ей схему расчета в виде НПКК на рис. 2, где  $C_1$  — угроза;  $C_2$  — уязвимость;  $C_3$  — информационный ресурс;  $C_4$  — реализация угрозы;  $C_5$  — риск (потенциальный ущерб), соответственно  $X_1$  — вероятность возникновения угрозы;  $X_2$  — вероятность наличия уязвимости;  $X_3$  — ценность (стоимость) информационного ресурса;  $X_4$  — вероятность успешной реализации угрозы;  $X_5 = R$  — уровень риска (значение ожидаемого потенциального ущерба).

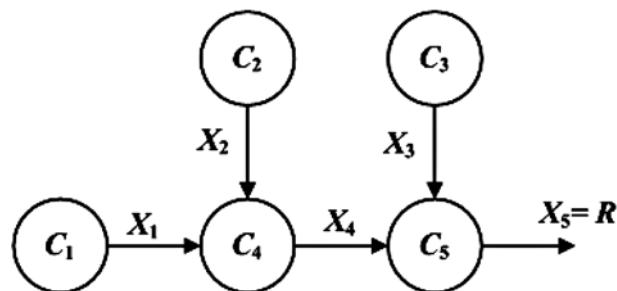


Рис. 2. Схема НПКК для оценки риска

Используя аппарат нечеткой логики, будем полагать, что каждая из указанных переменных состояния представляет собой лингвистическую переменную, принимающую одно из следующих значений:  $L$  — Low (Низкая (-ий));  $M$  — Medium (Средняя(-ий));  $MH$  — Medium High (Достаточно высокая (-ий));  $H$  — High (Высокая (-ий));  $VH$  — Very High (Очень высокая (-ий)). Каждое из этих нечетких подмножеств задается, в свою очередь, собственной функцией принадлежности (рис. 3).

На рис. 3 функции принадлежности нечетких подмножеств НПКК  $\mu(X_1), \mu(X_2), \mu(X_3)$  имеют треугольную форму, а функции принадлежности  $\mu(X_4), \mu(X_5)$  являются столбчатыми (singletons).

Систему нечетких продукционных правил, описывающих состояние концептов  $C_4$  и  $C_5$ , можно записать в виде:  
 концепт  $C_4$ :

$\Pi_1$ : Если  $X_1$  есть Низкая и  $X_2$  есть Низкая, то  $X_4$  есть Низкая;

...

$\Pi_{25}$ : Если  $X_1$  есть Очень\_высокая и  $X_2$  есть Очень\_высокая, то  $X_4$  есть Очень\_высокая;

концепт  $C_5$ :

$\Pi_{26}$ : Если  $X_3$  есть Низкая и  $X_4$  есть Низкая, то  $X_5$  есть Низкая;

...

$\Pi_{50}$ : Если  $X_3$  есть Очень\_высокая и  $X_4$  есть Очень\_высокая, то  $X_5$  есть Очень\_высокая.

Всего имеем:  $2 \cdot 5 \cdot 5 = 50$  правил, которые удобно представить в виде так называемых матриц риска (или таблиц решений) [21] (табл. 1, 2).

В клетках табл. 1 записаны соответствующие значения (термы) переменной  $X_4$ , в клетках табл. 2 — значения (термы) переменной  $X_5 = R$ , т. е. уровня риска.

Допустим, что в конкретном рассматриваемом случае входные переменные НПКК (т.е. три базовых фактора риска) принимают значения:  $X_1^* = 0,85$ ,  $X_2^* = 0,9$ ,  $X_3^* = 0,75$ . Обратившись к рис. 2 и приведенным таблицам, видим, что переменные  $X_1, X_2, X_3, X_4$  принимают только значения  $MH$  и  $H$ , т. е. из 50 правил активными окажутся только 8 правил, соответствующих выделенным блокам из четырех соседних клеток в правом верхнем углу табл. 1 и 2. Таким образом, редуцированная система нечетких продукционных правил принимает вид:

- |   |               |
|---|---------------|
| 1) если $X_1 = H$ и $X_2 = H$ , то $X_4 = H$ ;    | концепт $C_4$ |
| 2) если $X_1 = H$ и $X_2 = VH$ , то $X_4 = H$ ;   |               |
| 3) если $X_1 = VH$ и $X_2 = H$ , то $X_4 = H$ ;   |               |
| 4) если $X_1 = VH$ и $X_2 = VH$ , то $X_4 = VH$ ; |               |
| 5) если $X_3 = H$ и $X_4 = H$ , то $X_5 = H$ ;    | концепт $C_5$ |
| 6) если $X_3 = H$ и $X_4 = VH$ , то $X_5 = H$ ;   |               |
| 7) если $X_3 = VH$ и $X_4 = H$ , то $X_5 = H$ ;   |               |
| 8) если $X_3 = VH$ и $X_4 = VH$ , то $X_5 = VH$ . |               |

Используя операции нечеткой логики [21] для заданных "четких" значений переменных  $X_1^*$ ,

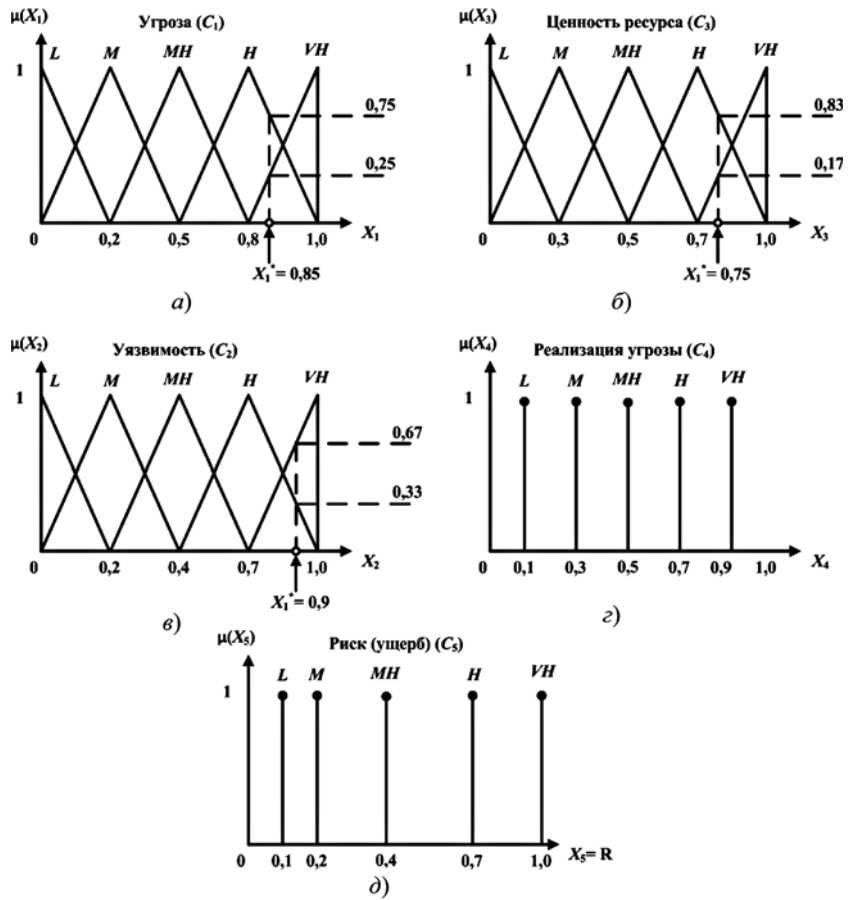


Рис. 3. Функции принадлежности нечетких множеств

$X_1$	$VH$	$MH$	$H$	$H$	$H$	$VH$
	$H$	$M$	$MH$	$H$	$H$	$H$
	$MH$	$M$	$M$	$MH$	$MH$	$H$
	$M$	$L$	$M$	$M$	$M$	$MH$
	$L$	$L$	$L$	$L$	$M$	$M$
		$L$	$M$	$MH$	$H$	$VH$
	$X_2$					

Таблица 1. Реализация угрозы  $C_4$

$X_3$	$VH$	$M$	$M$	$MH$	$H$	$VH$
	$H$	$L$	$M$	$MH$	$H$	$H$
	$MH$	$L$	$M$	$M$	$MH$	$MH$
	$M$	$L$	$L$	$M$	$M$	$M$
	$L$	$L$	$L$	$L$	$L$	$L$
		$L$	$M$	$MH$	$H$	$VH$
	$X_4$					

Таблица 2. Риск (ущерб)  $C_5$

$X_2^*$ ,  $X_3^*$ , получим значения уровней активностей данных правил:

$$\alpha_1 = 0,33; \alpha_2 = 0,67; \alpha_3 = \alpha_4 = 0,25; \alpha_5 = 0,33; \alpha_6 = 0,67; \alpha_7 = \alpha_8 = 0,17.$$

Объединяя правила 1—4 и 5—8 с помощью логической связки ИЛИ (т.е. операции MAX), получаем функции принадлежности для переменных  $X_4$  и  $X_5$  (рис. 4).

Применяя формулу (3), вычисляем дефазифицированные ("четкие") значения переменных

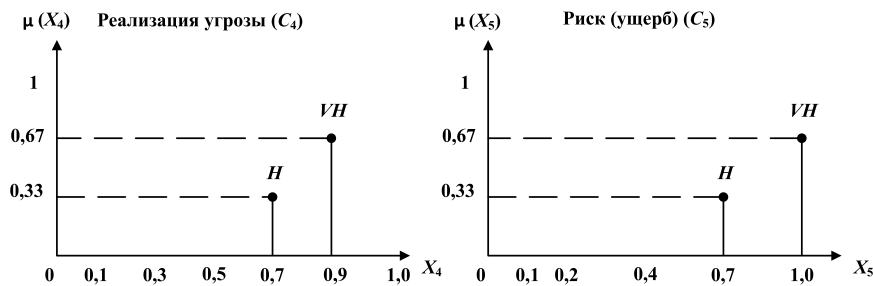


Рис. 4. Функции принадлежности нечетких переменных  $X_4$  и  $X_5$

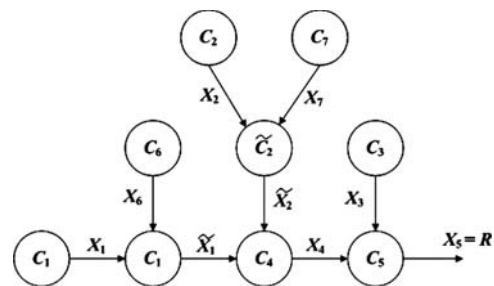


Рис. 5. Схема НПКК для оценки риска с учетом контрмер

$X_4^* = 0,83$ ;  $X_5^* = 0,9$ . Следовательно, искомое значение уровня риска  $R$ , т.е. ожидаемого потенциального ущерба от действия угрозы, равно 90 %.

Допустим теперь, что за счет применения специальных мер по защите информации (контрмер) требуется снизить уровень риска  $R$  до среднего ( $M$ ) или низкого ( $L$ ). В целях анализа эффективности различных способов управления риском воспользуемся НПКК, приведенной на рис. 5.

Здесь  $C_1, C_2, C_3$  — соответственно угроза, уязвимость и информационный ресурс (как и в предыдущем примере, речь идет об оценке последствий от реализации вирусной атаки);  $C_4$  и  $C_5$  — реализация угрозы и риск (потенциальный ущерб);  $C_6$  и  $C_7$  — ресурсы, выделяемые на парирование (блокирование) угрозы и устранение уязвимости;  $\tilde{C}_1$  и  $\tilde{C}_2$  — модифицированные (скомпенсированные за счет принятия контрмер) угроза и уязвимость. Соответственно в качестве переменных состояния концептов выступают:  $X_1$  — вероятность возникновения угрозы;  $\tilde{X}_1$  — вероятность скомпенсированной угрозы;  $\tilde{X}_2$  — вероятность скомпенсированной уязвимости;  $X_3$  — ценность (стоимость) информационного ресурса;  $X_4$  — вероятность успешной реализации угрозы;  $X_5 = R$  — уровень риска (значение ожидаемого потенциального ущерба);  $X_6$  и  $X_7$  — затраты на парирование угрозы и уязвимости.

То обстоятельство, что вновь введенные промежуточные концепты  $\tilde{C}_1$  и  $\tilde{C}_2$ , как и концепты  $C_4$  и  $C_5$ , являются "двухходовыми", позволяет представить базу нечетких продукционных правил НПКК в виде совокупности четырех отдельных таблиц, две из которых (приведенные выше) характеризуют изменение состояния концептов  $C_4$  и  $C_5$  в зависимости от состояния смежных концептов:  $X_1 \times \tilde{X}_2 \rightarrow X_4$  и  $X_3 \times X_4 \rightarrow X_5$ .

Дополнительные две таблицы будут определять состояния новых концептов  $\tilde{C}_1$  и  $\tilde{C}_2$  с учетом добавленных в НПКК внешних управляющих факторов  $C_6$  и  $C_7$ :  $X_1 \times X_6 \rightarrow \tilde{X}_1$  и  $X_2 \times X_7 \rightarrow \tilde{X}_2$  (табл. 3 и 4).

Будем полагать, что функции принадлежности для нечетких переменных  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  имеют тот же вид, что и на рис. 3. Для простоты принимаем, что функции принадлежности для переменных  $\tilde{X}_1$  и  $\tilde{X}_2$  имеют тот же вид, что и функции принадлежности переменных  $X_1$  и  $X_2$ , а функции принадлежности для переменных  $X_6$  и  $X_7$  совпадают по внешнему виду с функцией принадлежности для переменной  $X_3$  (напомним, что по оси абсцисс на графике рис. 3, в, отложены нормированные значения переменной).

Проведем оценку риска с помощью НПКК, представленной на рис. 5, используя следующие исходные данные:  $X_1^* = 0,85$ ;  $X_2^* = 0,9$ ;  $X_3^* = 0,75$  (как и в предыдущем примере);  $X_6^* = 0,9$ ;  $X_7^* = 0,85$  (управляющие факторы). Легко видеть, что, как и ранее, при реализации механизма нечеткого логического вывода задействуется лишь часть правил, приведенных в табл. 1–4, т.е. для расчетов можно воспользоваться схемой, представленной на рис. 6.

Выполнив необходимые вычисления по схеме рис. 6 в соответствии с алгоритмом Мамдани [21], используя при этом для реализации логических операций И и ИЛИ операторы MIN и MAX, а при фаззификации — метод взвешенного среднего (3), полу-

$X_1$	VH	VH	H	MH	M	M
	H	H	MH	MH	M	L
	MH	MH	M	M	M	L
	M	M	L	L	L	L
	L	L	L	L	L	L
	$\underbrace{L \quad M \quad MH \quad H \quad VH}_{X_6}$					

Таблица 3. Скомпенсированная угроза

$X_2$	VH	VH	H	MH	M	M
	H	H	MH	MH	M	L
	MH	MH	M	M	M	L
	M	M	L	L	L	L
	L	L	L	L	L	L
	$\underbrace{L \quad M \quad MH \quad H \quad VH}_{X_7}$					

Таблица 4. Скомпенсированная уязвимость

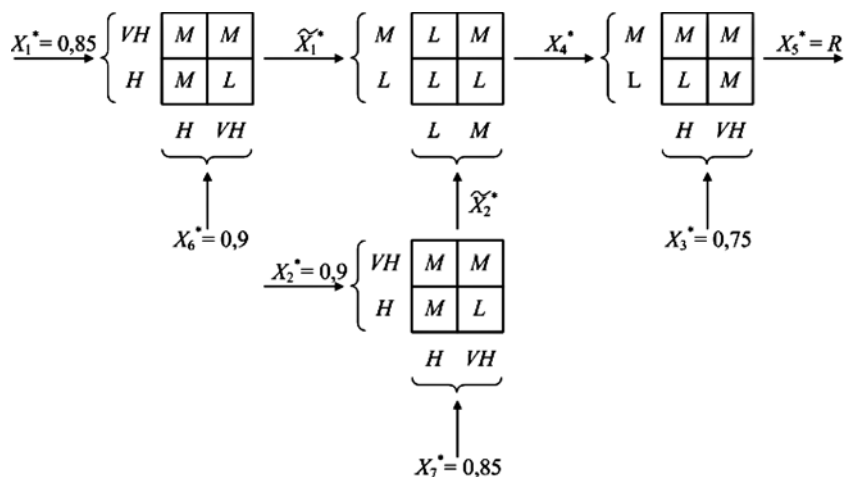


Рис. 6. Схема нечеткого логического вывода для оценки риска с учетом управляющих факторов

чим "четкие" (дефаззифицированные) значения промежуточных и выходной переменных НПКК:

$$\tilde{X}_1^* = 0,13; \tilde{X}_2^* = 0,16; X_4^* = 0,23; X_5^* = 0,26.$$

Таким образом, уровень риска  $R$  в результате принятия специальных мер по защите информации снизился с 90 до 26 %, т.е. в 3,5 раза.

Аналогичным образом можно проводить оценку риска для других исходных данных, отвечая на вопрос "Что будет, если...", рассматривая различные сценарии воздействия угроз и реализации защитных контрмер. Возможная постановка задачи — использование НПКК для выбора оптимального (рационального) способа защиты информации с учетом ограничений на значение риска и выделяемые ресурсы на реализацию контрмер. В данном случае можно рассматривать два варианта постановки задачи:

- 1)  $R \rightarrow \min$  при  $S_{\Sigma} \leq S_{\text{доп}}$ ;
- 2)  $S_{\Sigma} \rightarrow \min$  при  $R \leq R_{\text{доп}}$ ,

где  $S_{\Sigma}$  — суммарный объем средств (ресурсов), выделяемых на реализацию защитных мер (в рассмотренном примере  $S_{\Sigma} = X_6^* + X_7^*$ );  $S_{\text{доп}}$  — заданный (максимально допустимый) объем выделенных средств;  $R_{\text{доп}}$  — заданный (максимально допустимый) уровень риска.

### Заключение

В данной работе рассмотрены особенности применения одного из перспективных классов когнитивных моделей — нечетких продукционных когнитивных карт (НПКК) для решения задачи оценки рисков информационной безопасности.

В основе построения данных моделей используется описание взаимодействия между концептами,

образующими НПКК, с помощью системы нечетких правил (продукций), отражающих знания и опыт экспертов в данной предметной области.

На конкретном примере реализации вирусной атаки на информационный ресурс рассмотрены основные этапы выполнения алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани — фаззификация исходных данных, работа с правилами, дефаззификация (приведение к четкости).

К числу преимуществ предложенного подхода к оценке рисков, помимо наглядности и учета факторов неопределенности, относятся также гибкость и универсальность использования НПКК, заключающиеся в возможности расширения перечня учитываемых угроз, уязвимостей, защищаемых информационных ресурсов, а также категорий оценки рисков по видам ущерба от нарушения конфиденциальности, целостности и доступности информации.

### Список литературы

1. Петренко С. А., Симонов С. В. Управление информационными рисками. Экономически оправданная безопасность. М.: ДМК Пресс, 2005. 384 с.
2. Астахов А. М. Искусство управления информационными рисками. М.: ДМК Пресс, 2010. 312 с.
3. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. Изд. 2-е, стереотип. М.: Горячая линия — Телеком, 2012. 284 с.
4. Glykos M. (Ed.) Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Applications. Springer-Verlag, 2010.
5. Papageorgiou E. (Ed.) Fuzzy Cognitive Maps for Applied Science and Engineering: From Fundamentals to Extensions and Learning Algorithms. Springer-Verlag, 2014.
6. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps // Intern. Journal of Man-Machine Studies. 1986. Vol. 24. P. 65–75.
7. Hagiwara M. Extended Fuzzy Cognitive Maps // Proc. of the IEEE Conference on Fuzzy Systems, San-Diego, USA, 8–12 March, 1992. P. 161–172.
8. Борисов В. В., Федулов А. С. Обобщенные нечеткие когнитивные карты // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2004. № 4. С. 3–20.
9. Федулов А. С. Нечеткие реляционные когнитивные карты // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 1. С. 120–132.
10. Carvalho J. P., Tome J. A. B. Rule Based Fuzzy Cognitive Maps: Fuzzy Causal Relations // Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation: Evolutionary Computation & Fuzzy Logic for Intelligent Control, Knowledge Acquisition & Information Retrieval / Mohammadian (Ed.). — URL: www.inesc-id.pt/pt/indicadores/Ficheiros/1894.pdf (дата обращения: 24.09.2017).
11. Борисов В. В., Федулов А. С., Устиненков Е. С. Анализ динамики состояния сложных систем на основе обобщенных нечетких продукционных когнитивных карт // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2007. № 1. С. 17–23.

12. **Kandasamy V., Smarandache F.** Fuzzy Cognitive Maps and Neutrosophic Cognitive Maps, 2003. URL: <https://arxiv.org/ftp/math/papers/0311/0311063.pdf> (дата обращения: 24.09.2017).

13. **Byung Sung Yoon, Jetter. A. S.** Comparative Analysis for Fuzzy Cognitive Mapping // 2016 Proceedings of PICMET'16: Technology for Social Innovation, 2016. P. 1897–1908.

14. **Гузайров М. Б., Васильев В. И., Кудрявцева Р. Т.** Системный анализ информационных рисков с применением нечетких когнитивных карт // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5, № 4. С. 42–48.

15. **Степанова Е. С., Машкина И. В., Васильев В. И.** Разработка модели угроз на основе построения нечеткой когнитивной карты для численной оценки риска информационной безопасности // Известия ЮФУ, Технические науки / Тематич. выпуск Информационная безопасность. № 11 (112), 2010. С. 31–40.

16. **Ажмухаметов И. М.** Динамическая нечеткая когнитивная модель оценки уровня информационной безопасности информационных активов вуза // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика, 2012. № 2. С. 137–142.

17. **Yeboah-Boateng E. O.** Using Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) to Evaluate the Vulnerabilities with ICT Assets Disposal Policies // Intern. Journal on Electrical & Computer Sciences IJECS – IJENS. Oct. 2012. Vol. 12, N. 05. P. 20–31.

18. **Васильев В. И.** Интеллектуальные системы защиты информации: учеб. пособие для вузов. 3-е изд. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 201 с.

19. **Mazarakis S., Matsavinis G., Groumpos P.** Simulating and Forecasting Qualitative Macroeconomic Models Using Rule-Based Fuzzy Cognitive Maps // Intern. Journal on Social, Behavioral, Economic, Business and Industrial Engineering. 2013. Vol. 7, N. 1. P. 147–152.

20. **Перминов Г. И., Леонова Н. В.** Применение нечеткой логики для решения когнитивной карты при использовании комбинации альтернатив // Аудит и финансовый анализ. 2014. № 4. С. 396–401.

21. **Shapiro A. F., Koissi M.-C.** Risk Assessment Applications of Fuzzy Logic, March 2015. URL: <https://www.casact.org/education/annual/2015/presentations/C-13-Shapiro.pdf> (дата обращения: 24.09.2017)

DOI: 10.17587/it.24.266-273

**V. I. Vasilyev**, D.Sc., Professor, e-mail: [vasilyev@ugatu.ac.ru](mailto:vasilyev@ugatu.ac.ru),  
**A. M. Vulfin**, Ph.D., Assistant Professor, e-mail: [vulfin.alexey@gmail.com](mailto:vulfin.alexey@gmail.com),  
**M. B. Guzairov**, D.Sc., Professor, e-mail: [guzairov@ugatu.su](mailto:guzairov@ugatu.su),  
Ufa State Aviation Technical University

## Evaluation of Information Security Risks with Use of Rule-Based Fuzzy Cognitive Maps

*A brief overview of modern approaches to information security risk analysis connected with their qualitative evaluation is presented. The advantages of using fuzzy logic cognitive maps (FCM) for this purpose are besides their visualization and perception convenience also a possibility of modeling ill-defined situations and systems in the conditions of uncertainty. This circumstance is one of the main obstacles arising under their construction and application while solving the issues of information risk analysis and management.*

*The arguments for a choice of rule-based fuzzy cognitive maps (RBFCM) and the basic notions and definitions underlying the construction of this class of FCM are considered. The characteristic stages of information risk evaluation procedure with use of RBFCM are described. The example of evaluating the consequences from a virus attack action on some information asset with application of RBFCM is considered. The problem of optimal (rational) choice of countermeasures to decrease the possible loss from the threat action is discussed.*

**Keywords:** *information security, risk analysis and management, cognitive modeling, rule-based fuzzy cognitive map, risk evaluation, countermeasures on information protection*

### References

1. **Petrenko S. A., Simonov S. V.** *Upravlenie informacionnymi riskami. Ekonomicheski opravnannaya bezopasnost'*. (Information Risk Management. Economically justified safety), Moscow, DMK Press, 2005. 384 p. (in Russian).

2. **Astahov A. M.** *Iskusstvo upravleniya informacionnymi riskami* (The Art of Information Risk Management), Moscow, DMK Press, 2010. 312 p. (in Russian).

3. **Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S.** *Nechetkie modeli i seti.* (Fuzzy models and networks. Second edition, stereotype). Moscow, Goryachaya liniya — Telekom, 2012, 284 p. (in Russian).

4. **Glykos M. (Ed.)** *Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Applications*, Springer—Verlag, 2010.

5. **Papageorgiou E. (Ed.)** *Fuzzy Cognitive Maps for Applied Science and Engineering: From Fundamentals to Extensions and Learning Algorithms*, Springer-Verlag, 2014.

6. **Kosko B.** Fuzzy Cognitive Maps, *Intern. Journal of Man-Machine Studies*, 1986, vol. 24, pp. 65–75.

7. **Hagiwara M.** Extended Fuzzy Cognitive Maps, *Proc. of the IEEE Conference on Fuzzy Systems, San-Diego, USA, 8–12 March, 1992*, pp. 161–172.

8. **Borisov V. V., Fedulov A. S.** *Obobshchennye nechetkie kognitivnye karty* (Generalized fuzzy cognitive maps), *Nejrokomputyutery: razrabotka, primenenie*, 2004, no. 4, pp. 3–20 (in Russian).

9. **Fedulov A. S.** *Nechetkie relyacionnye kognitivnye karty* (Fuzzy relational cognitive maps), *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2005, no. 1, pp. 120–132 (in Russian).

10. **Carvalho J. P., Tome J. A. B.** Rule Based Fuzzy Cognitive Maps: Fuzzy Causal Relations, *Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation: Evolutionary Computation & Fuzzy Logic for Intelligent Control, Knowledge Acquisition & Information Retrieval*, available at: [www.inesc-id.pt/pt/indicadores/Ficheiros/1894.pdf](http://www.inesc-id.pt/pt/indicadores/Ficheiros/1894.pdf) (date of access: 24.09.2017).



11. **Borisov V. V., Fedulov A. S., Ustinov E. S.** *Analiz dinamiki sostoyaniya slozhnykh sistem na osnove obobshchennykh nechetkikh produkcionnykh kognitivnykh kart* (Analysis of the dynamics of the state of complex systems based on generalized fuzzy production cognitive maps), *Nejrokompyutery: Razrabotka, Primenenie*, 2007, no. 1, pp. 17–23 (in Russian).
12. **Kandasamy V., Smarandache F.** Fuzzy Cognitive Maps and Neutrosophic Cognitive Maps, 2003, available at: <https://arxiv.org/ftp/math/papers/0311/03111063.pdf> (date of access: 24.09.2017).
13. **Byung Sung Yoon, Jetter. A. S.** Comparative Analysis for Fuzzy Cognitive Mapping, *2016 Proceedings of PICMET'16: Technology for Social Innovation*, 2016, pp. 1897–1908.
14. **Guzairov M. B., Vasilev V. I., Kudryavceva R. T.** *Sistemnyy analiz informatsionnykh riskov s primeneniem nechetkikh kognitivnykh kart* (System analysis of information risks with the use of fuzzy cognitive maps), *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, Samara, 2007, vol. 5, no. 4, pp. 42–48 (in Russian).
15. **Stepanova E. S., Mashkina I. V., Vasilev V. I.** *Razrabotka modeli ugroz na osnove postroeniya nechetkoj kognitivnoj karty dlya chislennoj ochenki riska informatsionnoy bezopasnosti* (Development of a threat model based on the construction of a fuzzy cognitive map for the numerical assessment of the information security risk), *Izvestiya YUFU, Tekhnicheskie nauki, Tematich. vypusk "Informatsionnaya bezopasnost'"*, Taganrog, Publishing house of TTI YUFU, 2010, no. 11 (112), pp. 31–40.
16. **Azhmuhametov I. M.** *Dinamicheskaya nechetkaya kognitivnaya model' ochenki urovnya informatsionnoy bezopasnosti informatsionnykh aktivov vuza* (Dynamic fuzzy cognitive model for assessing the level of information security of university's information assets), *Vestnik AGTU. Ser.: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2012, no. 2, pp. 137–142.
17. **Yeboah-Boateng E. O.** Using Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) to Evaluate the Vulnerabilities with ICT Assets Disposal Policies, *Intern. Journal on Electrical & Computer Sciences IJECS – IJENS*, Oct. 2012, vol. 12, no. 05, pp. 20–31.
18. **Vasilev V. I.** *Intellektual'nye sistemy zashchity informatsii: ucheb. posobie dlya vuzov* (Intellectual systems of information protection: a textbook for high schools), Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017, 201 p. (in Russian).
19. **Mazarakis S., Matsavinis G., Groumpos P.** Simulating and Forecasting Qualitative Macroeconomic Models Using Rule-Based Fuzzy Cognitive Maps, *Intern. Journal on Social, Behavioral, Economic, Business and Industrial Engineering*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 147–152.
20. **Perminov G. I., Leonova N. V.** *Primenenie nechetkoj logiki dlya resheniya kognitivnoj karty pri ispol'zovanii kombinatsii al'ternativ* (The use of fuzzy logic for solving a cognitive map with using a combination of alternatives), *Audit i Finansovyy Analiz*, 2014, no. 4, pp. 396–401 (in Russian).
21. **Shapiro A. F., Koissi M.-C.** Risk Assessment Applications of Fuzzy Logic, March 2015, available at: <https://www.casact.org/education/annual/2015/presentations/C-13-Shapiro.pdf> (date of access: 24.09.2017).



Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН  
проводит с 17 по 22 сентября 2018 г. XX Всероссийскую конференцию



## Научный сервис в сети Интернет

Конференция посвящена основным направлениям и тенденциям использования интернет-технологий в современных научных исследованиях. Основная цель конференции — предоставить возможность для обсуждения, апробации и обмена мнениями о наиболее значимых результатах, полученных ведущими российскими учеными за последнее время в данной области деятельности.

### Тематика конференции

1. Научные исследования и интернет, интернет-представительство научных организаций и проектов.
2. Решение задач и обработка данных на суперкомпьютерах центров коллективного пользования.
3. Интернет-проекты в области параллельных вычислений, математическое моделирование, вычислительные сервисы.
4. Интернет-проекты для биомедицины.
5. Модели и методы построения поисковых систем и систем навигации в интернете, технологии и системы распределенного хранения и обработки данных.
6. Технологии и опыт построения информационных систем и баз данных, документации и результатов эксперимента на основе интернет-технологий.
7. Цифровые библиотеки и библиографические базы, семантический веб, наукометрия в интернете.
8. Онлайн-публикация, открытая наука, живая публикация, онлайн-рецензирование, мультимедийные иллюстрации.
9. Популярный научный интернет, онлайн-энциклопедии, история науки в интернете.
10. Интернет-активность ученого, персональная страница, профили ученого в библиографических базах, аттестация в интернете.
11. Системное и инструментальное программное обеспечение, языки и модели программирования, формальные методы для интернет-технологий.

Сайт конференции: <http://agora.guru.ru/abrau2018>

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

## INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ORGANIZATIONAL AND SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

УДК 004.942

DOI: 10.17587/it.24.274-288

А. Н. Родионов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., ran@newmail.ru,  
Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск

### Метод и алгоритм структурного анализа достижимости узлов в сетях потоков работ

*Постоянно растущая сложность деловых процессов, составляющих базис современной организации и управления сложными динамическими системами, объективно влечет за собой усложнение соответствующих моделей, известных как модели потоков работ (WorkFlow-сети). Разработано и используется множество методов обнаружения разнообразных дефектов, присущих таким моделям. В работе излагается метод, позволяющий определить достижимость отдельных узлов сети, не прибегая к стандартной процедуре преобразования WF-сети в сеть Петри. В методе используются элементы алгебры логики и ряд характеристик сети, отражающих ее организацию для установления полной, частичной достижимости или недостижимости узлов, появляющихся в экземплярах (реализациях) конкретной сети потоков работ.*

**Ключевые слова:** сеть потоков работ, верификация, анализ достижимости, бизнес-процесс

#### Введение

Информационные системы (ИС) поддержки потоков работ постепенно вытесняют ИС, ориентированные на регистрацию фактов. Функциональная часть таких систем представлена совокупностью структурных моделей (моделями потоков работ, WorkFlow-сетями), изображающих процесс в виде альтернативных последовательностей действий.

На сегодняшний день создано и используется множество языков моделирования, некоторые из которых, такие, например, как eEPC и IDEF3, стали стандартом де-факто. Все они представляют процессы в виде графов, которые в обязательном порядке включают логические узлы, моделирующие альтернативные реализации процессов, и узлы-действия, которые соотносятся с определенными управленческими директивами.

Аномалии (дефекты) WorkFlow (WF)-сетей достаточно хорошо изучены и исследованы. WF-сеть считается бездефектной, если выполняется ряд условий: ее завершение гарантировано, в ней отсутствуют "висячие" узлы, нет тупиков и активных блокировок [1, 2]. Разработано множество методов, позволяющих обнаружить все перечисленные дефекты. Среди них имеет смысл выделить две группы. Первую группу образуют методы, использующие сети Петри в качестве аналогов исходных се-

тей [1–9]. Теория сетей Петри включает алгоритмы обнаружения (но не исправления) потенциальных дефектов. Другая группа методов использует логику высказываний [10–12], что более естественно, если принять в расчет, что логические операции WF-сетей — это аналоги булевых функций конъюнкции, дизъюнкции и сложения по модулю 2.

Достижимость процесса трактуется как способность (свойство) всех его экземпляров завершиться в конечной точке. Бездефектная WF-сеть — гарантированно достижима. Тем не менее WF-сеть может оказаться достижимой и при наличии некоторых дефектов.

На практике достаточно распространены ситуации, когда один и тот же процесс может корректно завершиться не в одной, а в разных точках (множество терминальных вершин включает более одного элемента). Кроме того, для части реализаций процесса важно, чтобы были достигнуты не только конечные, но и промежуточные узлы, где, как и в терминальных, могут формироваться определенные результаты [13], на получение которых ориентирован процесс. (В ИС эти результаты представляются в виде фактов.) В этой связи задача достижимости приобретает иную, расширенную трактовку. Процесс будет считаться достижимым, если в результате его реализации могут быть достигнуты некоторые наперед заданные промежуточные вершины.

Постановка и решение такой задачи вызывают определенные затруднения, если предварительно не получены данные, касающиеся достижимости отдельных узлов.

Настоящая работа нацелена на разработку метода, позволяющего получить оценку достижимости всех узлов-действий для произвольного потока работ, который задан в виде WF-сетей.

Ниже перечислены обозначения, наиболее часто встречающиеся в работе:

- $\bar{c}_i$  — разворачивающий узел графа;
- $\underline{c}_j$  — сворачивающий узел графа;
- $a_k$  — функциональный узел графа;
- $v_n$  — узел графа;
- $\bar{c}_r$  — родительский узел  $v_n$ -го узла сети;
- $S_{v_n}$  — статус  $v_n$ -го узла графа;
- $S_{(\dots)}$  — статус дуги графа;
- $DomF_c$  — область определения булевой функции сворачивающего соединения;
- $\Delta_c$  — параметр свертки  $\underline{c}$ -соединения;
- $f_{\bar{c}L}(\bar{c}_i)$  — логическая операция разворачивающего узла;
- $f_{\underline{c}L}(\underline{c}_j)$  — логическая операция сворачивающего узла.

## 1. Модель бездефектной сети потоков работ. Постановка задачи достижимости

Сеть потоков работ — это ациклический связный ориентированный граф  $WF = (V, E)$ , где  $V$  — множество вершин (узлов), а  $E$  — множество ребер (дуг). В WF-графе различают вершины трех типов: действий (функциональных узлов,  $a$ -узлов), образующих множество  $A = \{a_k\}_1^a$ ; разворачивающих узлов ( $\bar{c}$ -узлов), составляющих множество  $\bar{C} = \{\bar{c}_i\}_1^{\bar{c}}$ ; сворачивающих узлов ( $\underline{c}$ -узлов), входящих во множество  $\underline{C} = \{\underline{c}_j\}_1^{\underline{c}}$ . По определению,  $V = A \cup \bar{C} \cup \underline{C}$ . Каждому сворачивающему и разворачивающему узлу ставится в соответствие определенная логическая операция (класс соединения): AND ( $\wedge$ ) — логическое И; OR ( $\vee$ ) — исключающее ИЛИ; XOR ( $\forall$ ) — включающее ИЛИ. Формально это означает, что имеют место функциональные зависимости:  $f_{\bar{c}L}: \underline{C} \rightarrow L$

и  $f_{\underline{c}L}: \bar{C} \rightarrow L$ , где  $L = \{\wedge, \vee, \forall\}$ , исключающие появление в WF-графе логических узлов, которым не назначены логические операции.

Обозначим через  $\cdot v$  — множество дуг, входящих в вершину  $v$ . Соответственно,  $v \cdot$  — множество дуг, исходящих из вершины  $v$ . Среди множества вершин выделим две вершины: начальную —  $a_s$ , для которой  $\cdot a_s = \emptyset$  и  $a_s \cdot \neq \emptyset$ , и терминальную —  $a_f$ , для которой  $\cdot a_f = \emptyset$  и  $a_f \cdot \neq \emptyset$ . Присутствие  $a_s$  и  $a_f$  в WF-сети обязательно. Выполнение данного условия гарантирует наличие единственной вершины, обозначающей "вход", и единственной вершины, ассоциирующей с "выходом". Отсюда, любой граф потоков работ будет всегда включать как минимум две вершины — начальную и терминальную.

Разворачивающие и сворачивающие узлы моделируют альтернативы реализаций действий. Исходя из этого, логично ограничиться определенными классами отношений, которые могут устанавливаться между узлами сети, относящихся к подмножествам  $A$ ,  $\bar{C}$  и  $\underline{C}$ . Наглядное представление о таких отношениях дают схемы, показанные на рис. 1.

Узлы-действия могут быть связаны либо с действиями, либо с разворачивающими или сворачивающими узлами. То же самое справедливо и в отношении разворачивающих и сворачивающих узлов. Штриховые линии показывают, что в конкретном экземпляре отношения могут принимать участие только узлы, принадлежащие одному из типов:  $A$ ,  $\bar{C}$  или  $\underline{C}$ .

В данной модели (вследствие включения в нее исходного и терминального узлов и обязательности непустых значений  $|\cdot v|$  и  $|v \cdot|$  для  $\forall v \in V$ ) исключено появление изолированных и дополнительных терминальных вершин. Тем не менее ни одна из моделей потоков работ не гарантирует отсутствия тупиков, когда процесс может завершиться в любой точке, не достигнув  $a_f$ . В то же время, другой элемент некорректности в виде "активной блокировки", представляющей собой бесконечный цикл, в настоящей модели отсутствует, так как по определению WF — это ациклический граф.

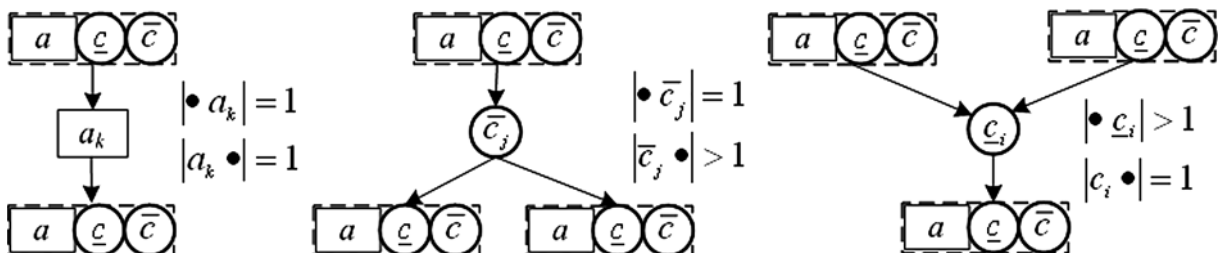


Рис. 1. Отношения между узлами сетей потоков работ

Каждой WF-сети после исключения из нее логических узлов соответствуют несколько "стандартных" сетей, в которых присутствуют только узлы-действия. Такие графы будем далее именовать графами реализации или экземплярами сети.

Для любого узла сети можно указать развернувший его узел (родительский узел — РУ). Сделать это можно следующим образом. Если к графу добавить фиктивный разворачивающий узел  $\bar{c}_d$ , предшествующий  $a_s$ , и поменять направления всех дуг в графе на противоположные, то каждому узлу сети, кроме  $\bar{c}_d$ , может быть поставлен в соответствие такой узел. Для части узлов-действий и разворачивающих узлов таким узлом окажется первый разворачивающий узел, лежащий на пути, который ведет от этих узлов к  $\bar{c}_d$ .

Для сворачиваемых узлов  $c_j$ , являющихся началом более чем одного пути, их родительскими узлами будут узлы, являющиеся конечными на всех путях, берущих начало в  $c_j$ .

Таким образом, в представленной модели, кроме множества функциональных зависимостей, отражающих отношения между узлами:  $f_{a\bar{c}}: A \rightarrow \bar{C}; f_{ac}: A \rightarrow C; f_{aa}: A \rightarrow A; f_{\bar{c}\bar{c}}: \bar{C} \rightarrow \bar{C}; f_{\bar{c}c}: \bar{C} \rightarrow C; f_{cc}: C \rightarrow C$  (последние две функции являются многозначными), присутствуют функциональные зависимости, показывающие "принадлежность" произвольного узла непосредственно или опосредованно развернутому его родительскому узлу:  $f_{a\bar{c}}: A \rightarrow \bar{C}; f_{\bar{c}\bar{c}}: \bar{C} \rightarrow \bar{C}; f_{\bar{c}c}: \bar{C} \rightarrow C$ . То же самое можно записать по-другому:  $f_{a\bar{c}}(a_k) = \bar{c}_r; f_{\bar{c}\bar{c}}(\bar{c}_i) = \bar{c}_r; f_{\bar{c}c}(\bar{c}_j) = \bar{c}_r$ , где  $\bar{c}_r$  — родительский узел соответственно узлов  $a_k, \bar{c}_i$  и  $c_j$ . Очевидно, что и  $\bar{c}_r$ , и  $\bar{c}_i \in \bar{C}$ .

Наглядное представление о родительских узлах графа потоков работ дает фрагмент WF-сети, показанный на рис. 2. Пунктирными линиями обозначены ссылки на родительские узлы.

Разрабатываемый метод — дальнейшее развитие группы методов, использующих логику вы-

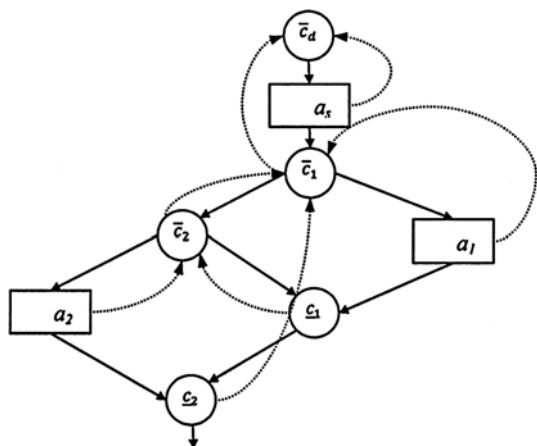


Рис. 2. Родительские узлы WF-сети

сказываний для обнаружения дефектов в сетях потоков работ. Он предназначен для определения полной или частичной достижимости или недостижимости функциональных узлов WF-сетей посредством последовательного посещения каждого из узлов. Вводится характеристика  $S_{v_n}$ , именуемая статусом узла  $v$ , которая может принимать одно из трех значений: '+', '±' и '-'. Если  $S_{v_n} = '+'$ , то это означает, что узел  $v$  появится во всех экземплярах сети. Если статус узла получает значение '±', то узел достижим только в части экземпляров сети. Значение '-' свидетельствует о полной недостижимости узла. Несмотря на то что разворачивающие и сворачивающие узлы никогда не появляются в реализациях сети, для них также вычисляется статус, так как эти узлы наравне с функциональными узлами могут быть задействованы в сворачивающих и разворачивающих операциях.

## 2. Статусы узлов WF-сети и алгоритм их вычисления

Начальный узел сети  $a_s$  всегда имеет статус '+',  $S_{a_s} = '+'$ . Если за  $a_s$  следуют узлы  $a$  или  $c$ , то их статусы также будут иметь значение '+' (наследовать статус предшествующего узла). Статус узла может измениться только в двух случаях — когда узлу предшествуют либо разворачивающий, либо сворачивающий узел, с которым соотнесена определенная логическая операция. Это можно увидеть на рис. 3, когда логические операции разворачивающего и сворачивающего узлов меняются с  $\wedge$  на  $\vee$ .

Чтобы получить набор формальных правил, позволяющих вычислить статусы узлов в процессе последовательного посещения вершин графа, будем также оценивать возможность появления или не появления дуг посредством нахождения статусов последних. Набор соответствующих правил

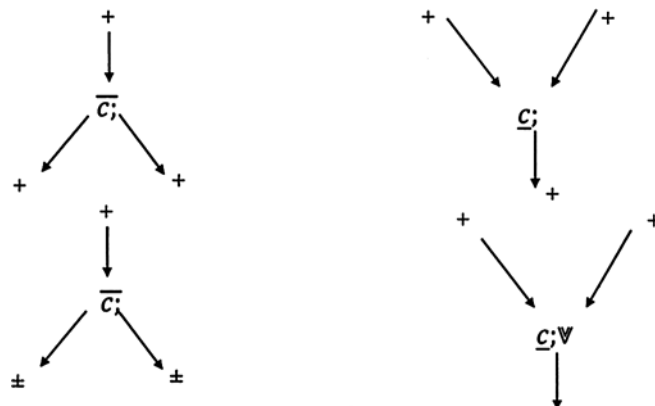


Рис. 3. Изменение статусов узлов WF-сети

для функциональных и сворачивающих узлов, а также дуг графа будет иметь следующий вид:

$$S_{\langle a_k, a_{k+1} \rangle} = S_{a_k}, \quad (1)$$

где  $S_{\langle a_k, a_{k+1} \rangle}$  — статус дуги  $\langle a_k, a_{k+1} \rangle$ , соединяющей вершину  $a_k$  с  $a_{k+1}$ ;

$$S_{\langle a_k, \bar{c}_i \rangle} = S_{a_k}; \quad (2)$$

$$S_{\langle a_k, \underline{c}_j \rangle} = S_{a_k}; \quad (3)$$

$$S_{\langle \bar{c}_i, a_k \rangle \vee \langle \bar{c}_i, \bar{c}_{i+1} \rangle \vee \langle \bar{c}_i, \underline{c}_j \rangle} = \begin{cases} '+', S_{\bar{c}_i} = '+' \wedge f_{\bar{c}_L}(\bar{c}_i) = '\wedge' \\ '\pm', S_{\bar{c}_i} = '\pm' \vee (S_{\bar{c}_i} = '+' \wedge (f_{\bar{c}_L}(\bar{c}_i) = \\ = '\Psi' \vee f_{\bar{c}_L}(\bar{c}_i) = '\vee'))); \\ '- ', S_{\bar{c}_i} = '- ' \end{cases} \quad (4)$$

$$S_{a_k} = S_{\langle a_{k-1}, a_k \rangle} \vee S_{\langle \bar{c}_i, a_k \rangle} \vee S_{\langle \underline{c}_j, a_k \rangle}; \quad (5)$$

$$S_{\bar{c}_i} = S_{\langle \underline{c}_j, \bar{c}_i \rangle} \vee S_{\langle a_k, \bar{c}_i \rangle} \vee S_{\langle \bar{c}_{j-1}, \bar{c}_i \rangle}. \quad (6)$$

Статусы дуг, исходящих из узлов-действий, будут совпадать со статусом исходной вершины-действия (1–3). Значения статусов дуг, берущих начало в  $\bar{c}$ -узлах, определяются на основании статусов разворачивающих узлов и логических операций этих узлов (4). Статусы  $a$  и  $\bar{c}$ -узлов могут быть вычислены на основании статусов входящих в них дуг (5, 6).

Вычисление статусов сворачивающих соединений представляет собой более сложную задачу. Обратимся к методу [11], позволяющему провести проверку на табуированность  $\underline{c}$ -узлов в WF-сетях.

Данный метод на основании значения логической операции, которое присваивается сворачиваемому узлу, и всех возможных сочетаний появления или не появления действий (или других категорий узлов), участвующих в свертке, дает возможность определить — достижимы или нет  $\underline{c}$ -узлы во всех или отдельных реализациях сети. С этой целью используются булевы функции конъюнкции, дизъюнкции и сложения по модулю два, которые соответствуют логическим операциям  $\wedge$ ,  $\vee$  и  $\Psi$ . Число переменных таких функций равно числу сворачиваемых узлов, а область определения  $DomF_{\underline{c}} = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n \times \dots \times V_m$ , где  $F_{\underline{c}}$  — вид булевой функции сворачивающего узла;  $m$  — число сворачиваемых узлов. Переменная принимает значение 1, если узел появляется в конкретной реализации сети, и значение 0 — в противном случае. В WF-сетях  $V_n = \{1, 0\}$  или  $V_n = \{1\}$ . На представленном ниже фрагменте сети (рис. 4) демонстрируется суть метода.

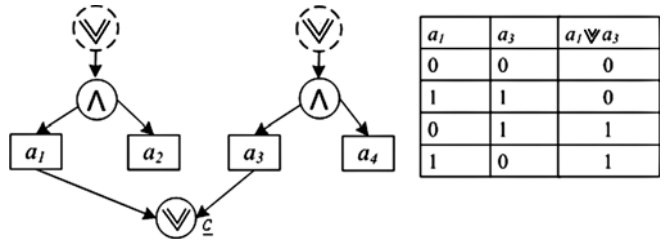


Рис. 4. Анализ на табуированность сворачивающего соединения

Состав  $DomF_{\underline{c}}$  зависит от двух факторов: класса соединения, которым развернуты действия (в представленном варианте сети и  $a_1$ , и  $a_3$  предшествует логическое  $\wedge$  —  $\wedge$ -класс), а также типа входа (вход  $\wedge$  или вход  $\Psi$ ) разворачивающего соединения. Вход  $\wedge$  показывает, что на всех путях, ведущих к разворачивающему узлу, могут присутствовать только разворачивающие узлы со значением  $\wedge$  либо вообще отсутствовать какие-либо разворачивающие соединения. Это также означает, что разворачивающий узел со значением входа  $\wedge$  появится во всех экземплярах сети. Вход  $\Psi$  свидетельствует об обратном — на одном или нескольких путях должен присутствовать разворачивающий узел с логическими значениями  $\Psi$  или  $\vee$ .

Посредством введенной характеристики  $S_{\Psi}$  метод проверки на табуированность  $\underline{c}$ -узлов может быть упрощен и встроен в процедуру вычисления статусов всех категорий узлов, присутствующих в WF-сетях. Для нахождения  $S_{\underline{c}}$  потребуется последовательно выполнить следующие действия.

Сначала на основании значений статусов, которые имеют сворачиваемые узлы, сформировать  $DomF_{\underline{c}}$ . Очевидно, что если  $S_{v_n} = '+'$ , где  $S_{v_n}$  — статус сворачиваемого узла, то  $v_n = 1$ . В случае, когда  $S_{v_n} = '\pm'$ , переменная  $v_n$  принимает значение или 0, или 1. При  $S_{v_n} = '-'$  всегда  $v_n = 0$ .

Следующим шагом должно стать вычисление всех значений булевой функции сворачивающего соединения  $\underline{c}$ .

И, наконец, для вычисления  $S_{\underline{c}}$  достаточно воспользоваться простой алгоритмической процедурой, использующей вспомогательный параметр  $I$ :

$$I = 0; \text{ for } k \text{ from } 1 \text{ to } |DomF_{\underline{c}}| \quad I = I + F_{\underline{c}}(x_1, \dots, x_n),$$

где  $F_{\underline{c}}(x_1, \dots, x_n)$  — булева функция соединения  $\underline{c}$ , сворачивающего  $m$  узлов WF-сети.

Получив подобным образом  $I$ , можно найти  $S_{\underline{c}}$ :

$$S_{\underline{c}} = \begin{cases} '- ', 0 < I < |DomF_{\underline{c}}| \\ '\pm ', I = |DomF_{\underline{c}}| \\ '- ', I = 0. \end{cases}$$

У только что изложенного метода есть один недостаток.  $DomF_{\underline{c}}$ , найденная только на основании статусов сворачивающих узлов, может оказаться некорректной, так как не учитывает ряд важных структурных особенностей организации WF-сетей. Отобразим эти особенности посредством выделения и классификации специфических подграфов, которые будем называть классами соединений.

Под классами соединений далее будем подразумевать сворачиваемые подграфы WF-сети, в которых узел  $\underline{c}$  выступает в качестве терминального узла. В такие подграфы включаются узлы, оказывающие влияние на состав области определения функции соединения  $\underline{c}$ . Кроме непосредственно самого узла  $\underline{c}$  и сворачиваемых узлов в такие подграфы входят родительские вершины, посредством которых были опосредованно раз-

вернуты сворачиваемые узлы, и узлы, непосредственно развернутые родительскими узлами. (Опосредованно означает, что между родительскими и сворачиваемыми узлами могут присутствовать промежуточные узлы.)

Обобщим и уточним сказанное, выделив, классифицировав и проанализировав все допустимые классы сворачиваемых конструкций WF-сетей на предмет получения корректных  $DomF_{\underline{c}}$ .

### 3. Классы и экземпляры сворачиваемых подграфов

Чтобы определиться с классами сворачиваемых подграфов, проведем их классификацию, выделив два признака, которые позволяют учесть все допустимые конфигурации подобных конструкций. Первый признак — это принадлежность всех сворачиваемых узлов одному или нескольким соединениям, которые их развернули. Второй признак призван показать, все ли узлы, развернутые одним соединением, свернуты другим. Введем параметр  $\Delta_{\underline{c}}$ , который количественно представит значение этого признака. Для его вычисления воспользуемся следующим выражением:  $\Delta_{\underline{c}} = N_W - N_U$ , где  $N_W$  — число узлов, которые были развернуты узлом, являющимся родительским для узла  $\underline{c}$ ;  $N_U$  — число узлов, сворачиваемых узлом  $\underline{c}$ . Здесь важно иметь в виду следующее. Если  $W_{\bar{c}_i}$  — множество узлов, которые развернуты соединением  $\bar{c}_i$ , то  $N_W = |W_{\bar{c}_i}|$ , а  $N_U = |U|$ ,  $U \subseteq W$ . Другими словами,  $N_W$  и  $N_U$  — это всегда характеристики, в данном случае мощности, двух множеств  $W$  и  $U$ , одно из которых является подмножеством другого.

Комбинации значений перечисленных признаков позволяют выделить классы сворачиваемых подграфов.

Подграфы, в которых все сворачиваемые узлы и непосредственно сам сворачивающий узел  $\underline{c}$  ссылаются на один и тот же родительский узел (рис. 5), назовем подграфами локальной свертки (ПЛС), а подграфы, содержащие больше одного РУ, — подграфами комбинированной свертки (ПКС). Среди ПКС будем различать ПКС, не содержащие вложенных сворачивающих подграфов (рис. 6), и ПКС, включающие таковые. В свою очередь, вложенными могут оказаться как

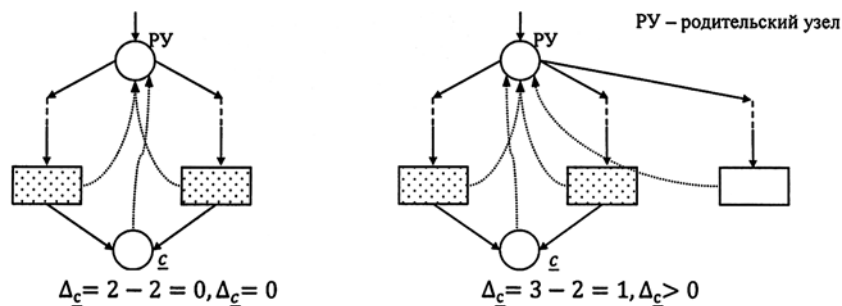


Рис. 5. Классы подграфов локальной свертки

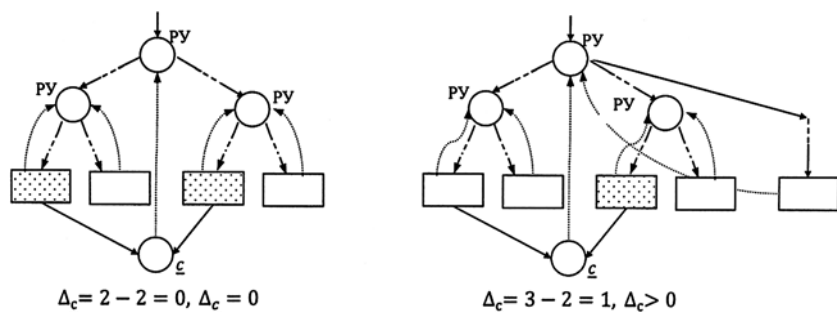


Рис. 6. Классы подграфов комбинированной свертки без элементов вложенности (простой ПКС)

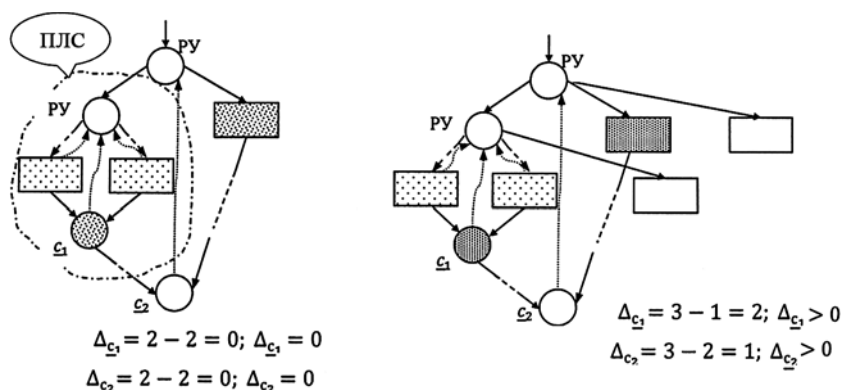


Рис. 7. ПКС с вложенными ПЛС

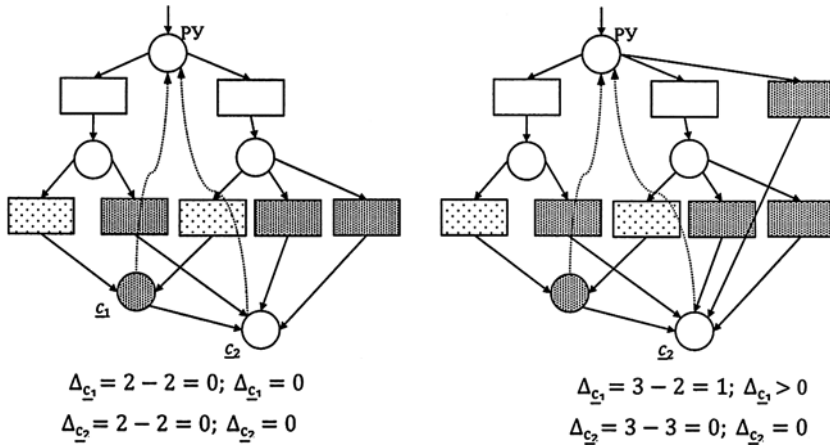


Рис. 8. ПКС с вложенными ПКС

ПЛС (рис. 7), так и ПКС (рис. 8). При этом число уровней вложенности неограниченно.

Подграфы с узлами  $c_1$  на рис. 7 считаются "вложенными" в подграфы с узлами  $c_2$  на том основании, что существует путь из  $c_1$  в  $c_2$ .

Согласно второму классификационному признаку выделяются подграфы с  $\Delta_c = 0$  и подграфы, в которых  $\Delta_c > 0$ .

На представленных схемах каждый узел ссылается на свой родительский узел, для чего задействованы пунктирные линии.

Проведем анализ полученных подграфов на предмет нахождения области определения функции сворачивающего узла  $c$  для всех возможных экземпляров таких подграфов. Экземпляры подграфа будут различаться статусами разворачиваемых узлов (родительских узлов) и логическими функциями этих узлов. Полученные результаты представим графически в виде таблиц истинности, исключив из последних строки, которые не могут в них появиться вследствие влияния статусов сворачиваемых и разворачивающих узлов, а также вида логической функций РУ. Число возможных сочетаний статусов и логических функций (три значения статуса и три разновидности логических функций) будет равно девяти экземплярам, что составит область анализа.

#### 4. Экземпляры подграфов локальной свертки

Для экземпляров ПЛС будет характерна следующая картина (рис. 9). Каждый из изображенных экземпляров содержит дополнительный узел  $a_k$ , отличный от  $c$ . Для каждого экземпляра приведены по две таблицы истинности: одна для конфигурации с  $\Delta_c = 0$ , другая с  $\Delta_c > 0$ .

Дадим несколько важных пояснений к содержанию представленных таблиц истинности (ТИ).

Статусы сворачиваемых узлов в ПЛС всегда имеют одинаковые значения, так как у них об-

щий родительский узел. Для подграфа, показанного на рис. 9, а, первоначальная, максимально возможная область определения найдена исходя из статусов, которые имеют узлы  $a_1$  и  $a_2$ . Нулевая (0-строка) и единичная (1-строка) строки вычеркнуты из таблицы истинности ввиду того, что логическая операция  $\vee$  (XOR) разворачивающего узла исключает одновременное присутствие узлов  $a_1$  и  $a_2$  в реализационных графах, равно как и отсутствие любого из них. (Нулевыми и единичными названы строки, которые содержат либо только нули, либо только единицы соответственно.)

Аналогичные рассуждения применены для всех представленных экземпляров сворачиваемых подграфов.

Обратим отдельное внимание на нулевые строки двух таблиц на рис. 9, а, и рис. 9, ж, помеченные символом  $\surd$ . Своим появлением они обязаны: наличию дополнительного узла  $a_k$ , статусу '+' и логическим операциям  $\vee$  или  $\vee$  родительского узла. Вследствие этого в части реализационных графов присутствует узел  $a_k$  и отсутствуют узлы  $a_1$  и  $a_2$ .

Увеличение числа сворачиваемых узлов до трех и более узлов никаким образом не повлияет на сделанные выводы, касающиеся исключения или включения определенных категорий (разновидностей) строк из таблиц истинности, вне зависимости от того, какие это строки: нулевые, единичные или это строки, в которых присутствуют и нули, и единицы. Для каждого экземпляра сворачиваемого подграфа будет характерен свой набор разновидностей строк. (В последующем это свойство будет использовано при разработке алгоритма вычисления статусов сворачивающих соединений.)

#### 5. Экземпляры подграфов комбинированной свертки

Исходя из представленных выше соображений проведем такой же анализ для экземпляров подграфов комбинированной свертки (рис. 10), ограничившись в этом случае заключениями, касающимися только фактов появления (исключения) нулевых и единичных строк в (из) ТИ. (Наличие или отсутствие строк, в которых чередуются нули и единицы, определяется на основании статусов сворачиваемых узлов.) Перечислим сначала отличия, которыми различаются подграфы локальных и комбинированных свертки.

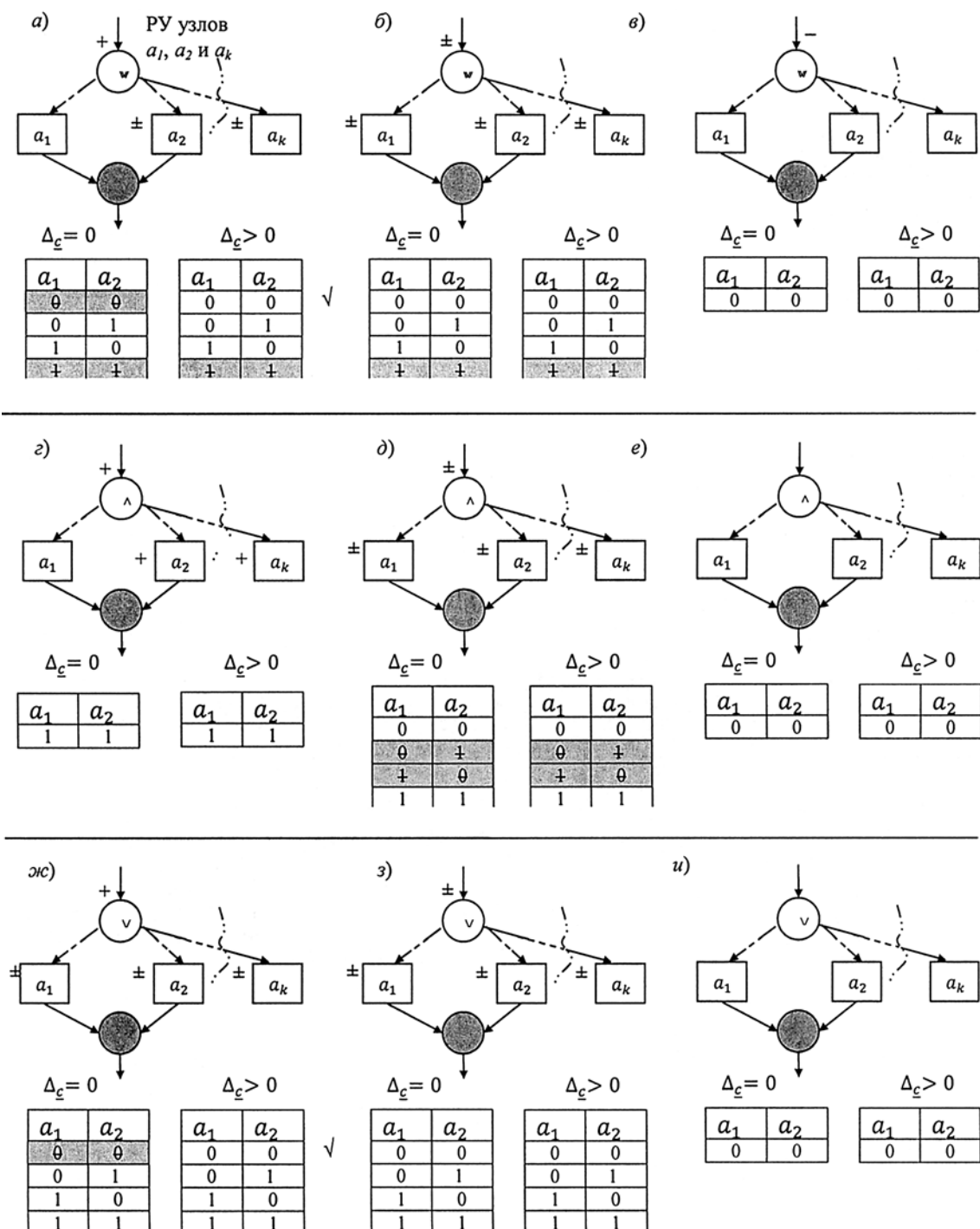


Рис. 9. Свертка узлов, развернутых единственным соединением

Во-первых, при комбинированной свертке ни о каком исчерпывающем влиянии статуса  $S_{\bar{c}}$  и логической операции  $f_{\bar{c}L}(\bar{c})$ , здесь  $\bar{c}$  — родительский узел сворачиваемых узлов, на состав  $DomF_{\bar{c}}$ , как это имеет место в ПЛС, не может быть речи, вследствие того что число  $\bar{c}$  всегда будет больше единицы (для каждого сворачиваемого узла всегда существует собственный развернувший его узел). В то же время в WF-сети всегда присутствует общий предок, который раз-

вернул и сворачиваемые узлы, и узел  $\bar{c}$ . Роль этого предка играет родительский узел узла  $\bar{c}$ , который может быть найден в соответствии с изложенным ранее алгоритмом. Его статус и вид его логической операции могут оказывать влияние на одновременное появление или неоявление сворачиваемых узлов в реализационных графах.

Во-вторых, на основании только одного анализа  $S_{\bar{c}}$  и  $f_{\bar{c}L}(\bar{c})$ , где  $\bar{c}$  — это уже родительский узел узла  $\bar{c}$ , сделать однозначное заключе-



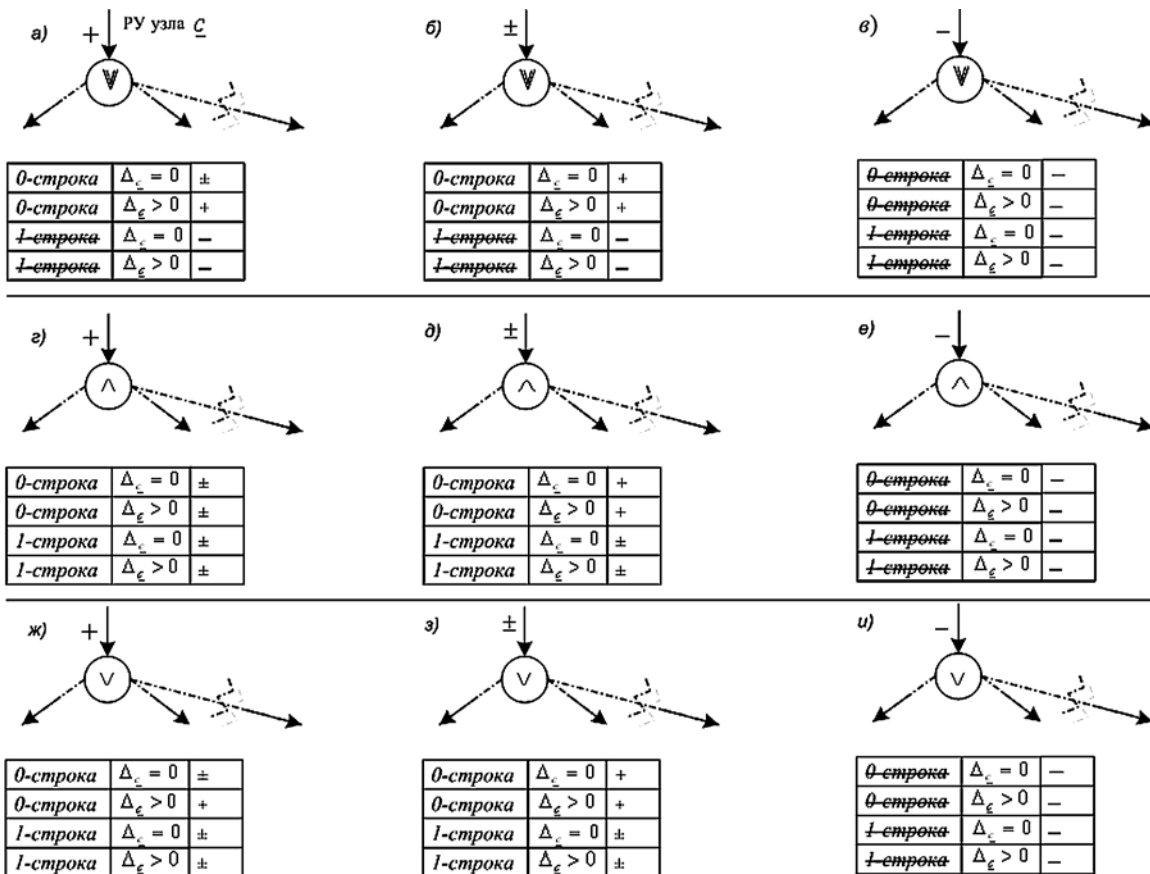


Рис. 10. Свертка узлов, развернутых несколькими соединениями

ние о присутствии или отсутствии 0-строк или 1-строк в ТИ для некоторых экземпляров ПКС нельзя. Можно говорить только о возможности, невозможности или обязательности наличия таких строк.

В-третьих, значение переменной  $N_U$ , используемой для нахождения  $\Delta_c$ , нельзя вычислить на основании простого суммирования узлов, участвующих в свертке, как это было сделано в случае с ПЛС.

Чтобы показать обязательность, возможность или невозможность появления сворачиваемых узлов в реализационных графах, будем использовать те же символы '+', '±' и '-', что и для значений статусов узлов.

Так, например, для экземпляра ПКС, показанного на рис. 10, а, 0-строка может появиться в ТИ только при условии определенных значений статусов сворачиваемых соединений. Действительно, конфигурация данного экземпляра подграфа допускает такую возможность, но ее реализация определится в итоге статусами конкретных сворачиваемых узлов, один из которых, например, может иметь статус '+'.  
 Таким образом, во всех реализациях WF-сетей, если обнаруживаются экземпляры ПКС, в которых допускается возможность одновремен-

ного присутствия или отсутствия сворачиваемых узлов (оценка '±' в таблицах истинности на рис. 10), окончательное решение о появлении таких строк принимается на основании статусов сворачиваемых узлов.

Основная сложность, которая возникает при нахождении  $DomF_c$  в ПКС, заключается в определении значения  $N_U$ . Для этого требуется найти все исходные (развернутые узлом, являющимся родительским для  $\underline{c}$ ) вершины, из которых в WF-графе есть путь в  $\underline{c}$ . Сделать это можно в процессе обхода графа на основе алгоритма (который приводится ниже), сохраняя при этом для каждого узла  $\underline{c}$  информацию о сворачиваемых им вершинах либо перемещаясь назад по пути из  $\underline{c}$  в  $\bar{c}$  до тех пор, пока не произойдет одно из событий: не будет достигнут  $\bar{c}$  или посещен какой-либо из узлов  $\underline{c}$ . Наглядное представление о способе вычисления  $N_U$  покажем на примере графа, изображенного на рис. 11. Вершины, сворачиваемые  $\underline{c}$ -узлами, перечислены в круглых скобках.

Для нахождения вершин, сворачиваемых  $\underline{c}_1$ , потребуется пройти четыре пути, которые заканчиваются в ПУ. Для узла  $\underline{c}_2$  — три пути, один из которых завершится в вершине  $\underline{c}_1$ . Посещение узла  $\underline{c}_1$  даст информацию об уже обнаруженных сворачиваемых вершинах  $a_1$  и  $a_2$ .

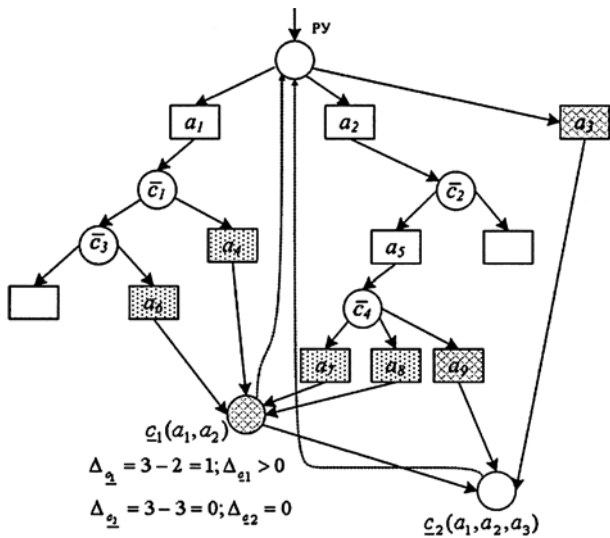


Рис. 11. ПКС с вложенными ПКС

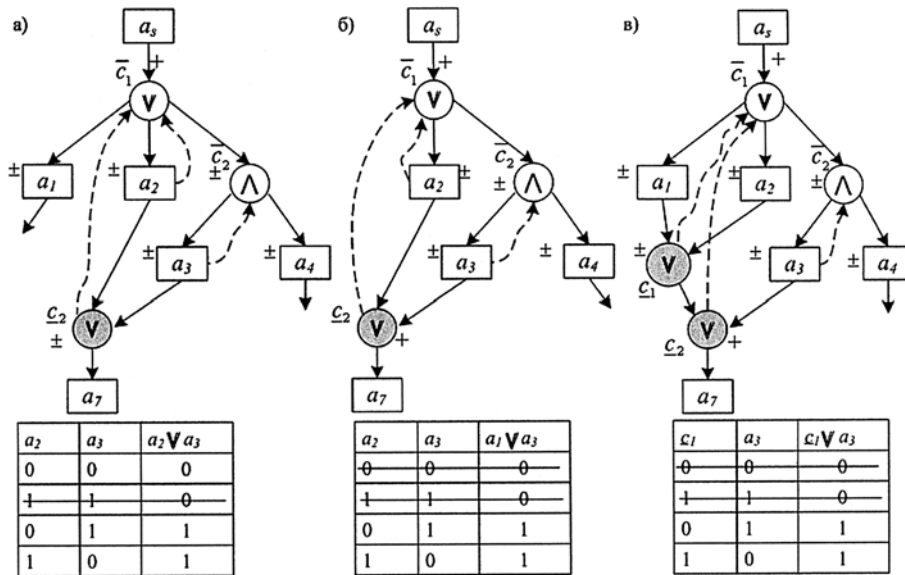


Рис. 12. Области определения функций сворачиваемых соединений

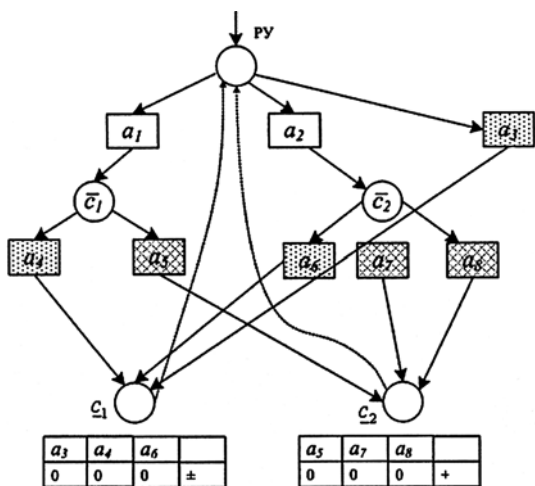


Рис. 13. Простые ПКС с общим РУ

В качестве примера использования полученных результатов приведем еще несколько фрагментов WF-сетей, содержащих ПКС (рис. 12). ТИ на всех рисунках относятся к  $c_2$ .

Ранее в данной работе специальным образом был выделен класс ПКС с вложенными ПЛС. Вычисление статуса сворачивающего соединения ПЛС должно строиться в соответствии с процедурой для ПЛС, дополненной алгоритмом поиска узлов, развернутых узлом, являющимся родительским для  $c$  анализируемого ПКС.

Завершим анализ сворачиваемых соединений ПКС рассмотрением еще одной конфигурации ПКС, которая не была отдельно классифицирована, воспользовавшись примером (рис. 13).

Подграфы с  $c_1$  и  $c_2$  не являются вложенными, поскольку нет пути ни из  $c_1$  в  $c_2$ , ни из  $c_2$  в  $c_1$ , в то же время есть в наличии общий родительский узел. В этом случае, как и для всех различных ПКС, отсутствует какое-либо взаимное влияние одного подграфа на другой, способное изменить область определения функций сворачиваемых узлов.

Поэтому расчет  $S_{c_1}$  и  $S_{c_2}$  необходимо вести как для простых ПКС. Обратим внимание на возможность и обязательность 0-строк в ТИ для  $c_1$  и  $c_2$  соответственно применительно к данной конкретной конфигурации WF-сети.

В то же время, в представленном фрагменте сети присутствуют два узла —  $a_7$  и  $a_8$ , развернутые одним и тем же узлом  $c_2$ . Следовательно, узел  $c_2$  одновременно выполняет и локальную, и комбинированную свертки. В связи с этим возникает закономерный вопрос, касающийся процедуры нахождения  $Dom c_2$ .

Очевидно, что в этом случае  $S_{c_2}$  и  $f_{c_2}(\bar{c}_2)$  определяют возможные сочетания  $a_7$  и  $a_8$  в  $Dom F_{c_2}$ .

## 6. Алгоритм расчета статусов узлов WF-сети

Предложенный метод анализа достижимости узлов WF-сетей уже включает ряд элементов алгоритмического формата, что облегчает его дальнейшую алгоритмизацию и кодирование. В то же время в рамках одной работы изложить организацию, логику и функционирование всей программы, состоящей из нескольких модулей, крайне проблематично. Поэтому сконцентрируемся толь-

ко на ключевых моментах базового (опорного) алгоритма, в соответствии с которым проводятся обход графа и расчет статуса его узлов, а также на вспомогательном алгоритме нумерации вершин графа.

Любой алгоритм бессмысленно строить и анализировать его эффективность, если не принимать в расчет организацию структур, в которых будут размещаться данные, обрабатываемые алгоритмом. Это имеет отношение как к структурам оперативной и долговременной памяти, так и к вспомогательным структурам, которые будут использованы алгоритмом во время расчета.

В качестве структур "постоянного" хранения задействованы реляционные таблицы. Структуры оперативной памяти и вспомогательные структуры представлены двунаправленным списком примыканий и очередью, которая используется для обхода графа (рис. 14).

Двунаправленный список примыканий состоит из базового пятимерного массива длины  $N$ , где  $N$  — число узлов графа, и двух примыкающих ступенчатых массивов — правостороннего и левостороннего. Каждая строка базового массива содержит сведения об отдельном узле графа, а строки примыкающих массивов — данные о смежных узлах.

Ступенчатый массив представляет собой массив списков. Каждый отдельный список соотносится с  $n$ -м узлом графа. В условных правостороннем и левостороннем списках перечисляются вершины, образующие упорядоченные пары с  $n$ -м узлом: в правостороннем списке — вершины, исходящие из  $n$ , в левостороннем списке — вершины, входящие в  $n$ -й узел.

Алгоритм строится "вокруг" очереди, в которую последовательно, в процессе обхода графа, помещаются узлы. На первом шаге из списка узлов выбирается первый узел. Выборка всех последующих узлов проводится на основании информации, содержащейся в правостороннем списке примыканий. Сворачивающиеся узлы попадают в очередь только в том случае, если посещены все узлы (прошли очередь либо уже присутствуют в ней), являющиеся родительскими по отношению к сворачиваемому узлу.

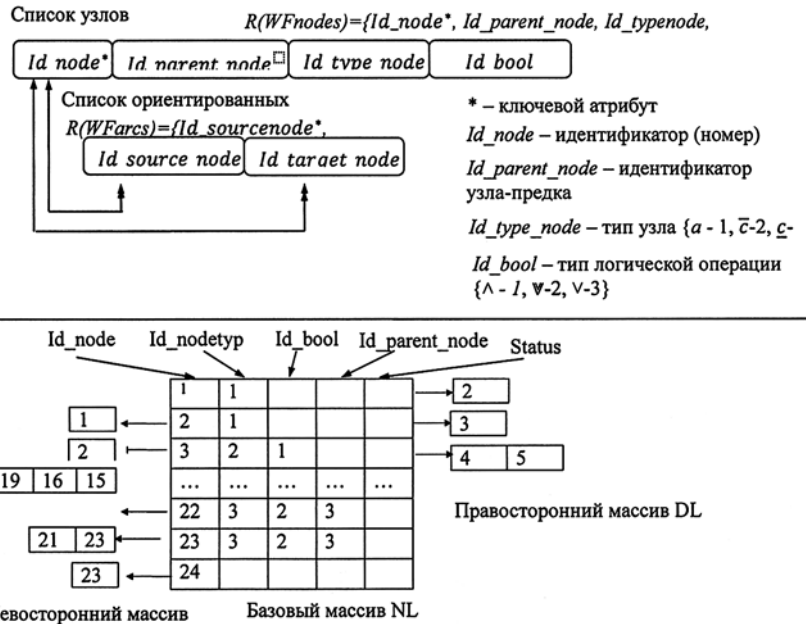


Рис. 14. Структуры для представления WF-сети в оперативной и долговременной памяти

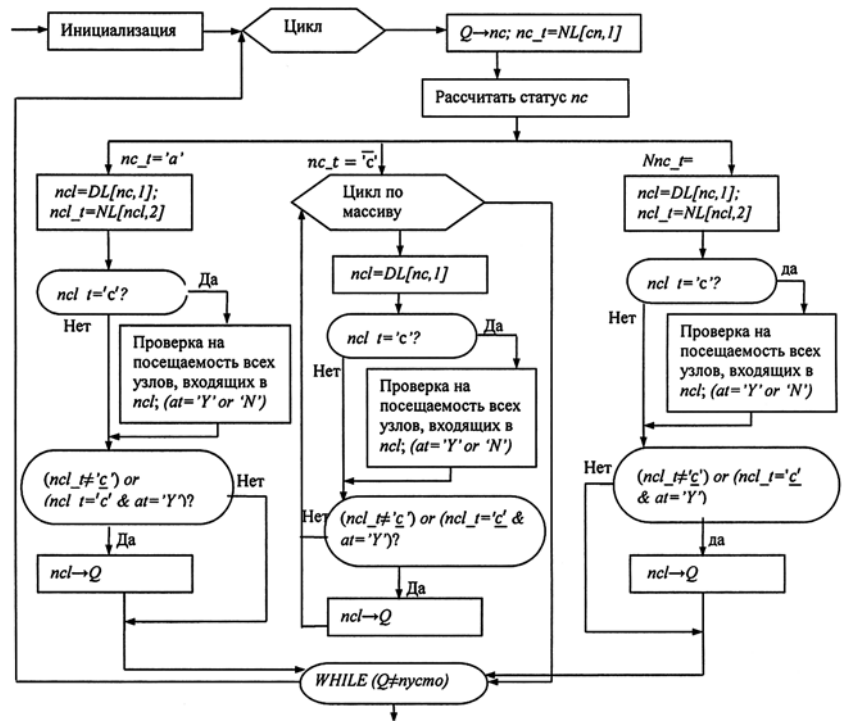


Рис. 15. Блок-схема алгоритма обхода WF-графа

За вычисление статуса узла отвечает метод  $Status(nc)$ , принимающий в качестве входного параметра номер узла  $nc$ . Алгоритм, реализуемый этим методом, предусматривает создание таблиц истинности для сворачиваемых узлов и выполнение инструкций по расчету статуса, которые были представлены в работе ранее.

Блок-схема алгоритма обхода графа и вычисления статусов его узлов показаны на рис. 15.

## Алгоритма обхода WF-графа

1. Создать очередь  $Q$ , разместить в ней первый элемент из списка узлов  $NL[1, 1] \rightarrow Q$  и присвоить ему статус "+":  $NL[1, 5] = '+'$ .

2. Организовать цикл с проверкой условия на отсутствие элементов в очереди в конце цикла.

3. Извлечь очередным элементом из очереди  $Q \rightarrow nc$  и определить тип извлеченного узла  $nc\_t = NL[nc, 2]$ .

4. Если  $nc\_t = 'a'$ , то получить прилинкованный к  $nc$  узел  $ncl = DL[nc, 1]$  и определить его тип  $ncl\_t = NL[ncl, 2]$ .

4.1. Если  $ncl\_t = 'c'$ , то проверить, все ли узлы, входящие в  $ncl$ , посещены. Для этого организовать цикл по строке массива  $IL$  с индексом  $ncl$  и удостовериться, все ли узлы, перечисленные в этой строке, получили статусы. Если 'да', то присвоить переменной  $at$  значение 'Y'.

4.2. Если  $((ncl\_t \neq 'c') \text{ or } (ncl\_t = 'c' \ \& \ at = 'Y'))$ , то отправить прилинкованный к  $nc$  узел в очередь  $ncl \rightarrow Q$ .

5. Если  $nc\_t = 'c'$ , то организовать цикл по строке массива  $DL$  с индексом  $nc$  и получить из

$DL[nc, \dots]$  последовательно все узлы, размещая их в  $nc\_l$ .

5.1. Если тип  $nc\_l = 'c'$ , то выполнить проверку на посещаемость всех входящих узлов в  $ncl$  узлов (по аналогии с шагом 4.1).

5.2. Если  $(ncl\_t \neq 'c') \text{ or } (ncl\_t = 'c' \ \& \ at = 'Y')$ , то отправить прилинкованный к  $nc$  узел в очередь  $ncl \rightarrow Q$ .

6. Если  $nc\_t = 'c'$ , то организовать цикл по строке массива  $DL$  с индексом  $nc$  и получить последовательно из  $DL[nc, \dots]$  все узлы, размещая их в  $nc\_l$ .

6.1. Если тип  $nc\_l = 'c'$ , то выполнить проверку на посещаемость всех входящих узлов в  $ncl$  узлов (по аналогии с шагом 4.1).

6.2. Если  $(ncl\_t \neq 'c') \text{ or } (ncl\_t = 'c' \ \& \ at = 'Y')$ , то отправить прилинкованный к  $nc$  узел в очередь  $ncl \rightarrow Q$ .

7. Если в очереди не осталось элементов, то завершить алгоритм, если остались — перейти к следующему шагу цикла.

Рассмотрение базового алгоритма завершим текстом программы на языке C# (Листинг 1). (Индексация элементов массивов в листинге отличается от индексации в описании алгоритма, поскольку в языке C нумерация индексов начинается с нулевого элемента.)

### Листинг 1

```

Queue<int> Q = new Queue<int>(); // Создание экземпляра очереди
int nc, nc_t, ncl, ncl_t; // nc — текущий узел; nc_t — тип текущего узла; ncl — прилинкованный узел;
ncl_t — //тип прилинкованного узла
char at; // признак посещаемости узла
NL[0, 5] = 1; // Установка статуса исходного узла
Q.Enqueue(NodesList[0, 0]); // Размещение узла в очереди
do { nc = Q.Dequeue(); // Извлечение узла из очереди
if (NL[nc-1, 5] == 0)
    Status(nc); // Расчет статуса узла
nc_t = NL[nc - 1, 2]; at = 'Y';
    switch (nc_t) {
        case 1: // Тип узла — a
            ncl = DL[nc - 1][0];
            if (NL[ncl - 1, 2] == 3) { // Встретился сворачивающий узел
                foreach (int j in IL[ncl-1]) {
                    if (NL[j-1,5] == 0) { at = 'N';
                    break; } }
                if (at == 'Y') // все родительские узлы посещены
                    Q.Enqueue(ncl); } else
                    Q.Enqueue(ncl); break;
        case 2: // Тип узла c
            foreach (int k in DL[nc - 1]) {
                if (NL[k - 1, 2] == 3) { // Встретился сворачивающий узел
                    foreach (int j in IL[k - 1]) {
                        if (NL[j - 1, 5] == 0) { at = 'N'; break; } }
                    if (at == 'Y') Q.Enqueue(k); }
                else Q.Enqueue(k) ;; break;
    }
}

```

```

case 3:
    ncl = DL[ncl - 1][0];
    if (NL[ncl - 1, 1] == 3) {
        foreach (int j in IL[ncl - 1]) {
            if (NL[j - 1, 5] == 0) { at = 'N';
                break; }
            if (at == 'Y')
                Q.Enqueue(ncl);
            break;
            default: break; }
    } while (Q.Count != 0);

```

```

// Тип узла c
// Встретился сворачивающий узел

```

Программа в качестве очереди использует экземпляр стандартного класса *Queue*, входящего в пространство имен *System.Collection*.

Временная сложность алгоритма обхода графа потоков работ может быть установлена на основании числа посещений узлов. Все узлы графа, за исключением сворачивающих узлов, посещаются однократно. Число посещений любого  $c$ -узла равно числу входящих в него дуг. Отсюда, с учетом несущественного превышения, временная сложность алгоритма составит  $O(n + m)$ , где  $n$  и  $m$  — соответственно число узлов и дуг графа. Для сравнения, алгоритм построения дерева достижимости сети Петри требует экспоненциального объема памяти и времени решения [14].

Представленный алгоритм обхода корректен, если выполняются два условия:

- индекс разворачивающего узла меньше индекса узлов, которые им непосредственно развернуты;
- индекс сворачивающего узла больше индекса узлов, которые он разворачивает.

Выполнение этих двух условий гарантирует, что для элемента, извлекаемого из очереди, перед тем, как будет рассчитан его статус, уже будут известны статусы всех родительских узлов, входящих в сворачивающий подграф. В этой связи обход графа должно предварять выполнение действий, приводящих к нумерации узлов графа, удовлетворяющей представленным условиям.

Поскольку в отличие от процедуры, вычисляющей статусы узлов, алгоритм нумерации носит вспомогательный характер, ограничимся его схематическим представлением, проиллюстрировав его на примере нумерации узлов графа, который будем использовать в качестве контрольного примера (рис. 16).

Требуемый результат может быть получен при использовании процедуры обхода графа по уровням. Стандартный алгоритм обхода гарантирует соблюдение первого условия. Действительно,

разворачивающий узел будет всегда посещен раньше узлов, которые он разворачивает, поскольку он всегда располагается на более низком уровне. Что касается выполнения второго условия, то алгоритм обхода следует дополнить блоком, проверяющим обязательность посещения всех узлов, входящих в сворачиваемый узел. Это можно сделать таким же образом, как это сделано в представленном алгоритме обхода WF-графа. Достаточно обратиться к спискам примыкающих узлов, содержащихся в левостороннем массиве примыканий.

Данные о посещаемых узлах и присваиваемых им номерах содержатся в табл. 1. Сворачиваемые узлы в соответствии с алгоритмом могут посещаться несколько раз. И только после последнего посещения им присваивается номер.

В завершение проиллюстрируем работу программы обхода и расчета статусов узлов на примере того же самого графа, что приведен на рис. 16, присвоив  $\bar{c}$ - и  $c$ -узлам определенные

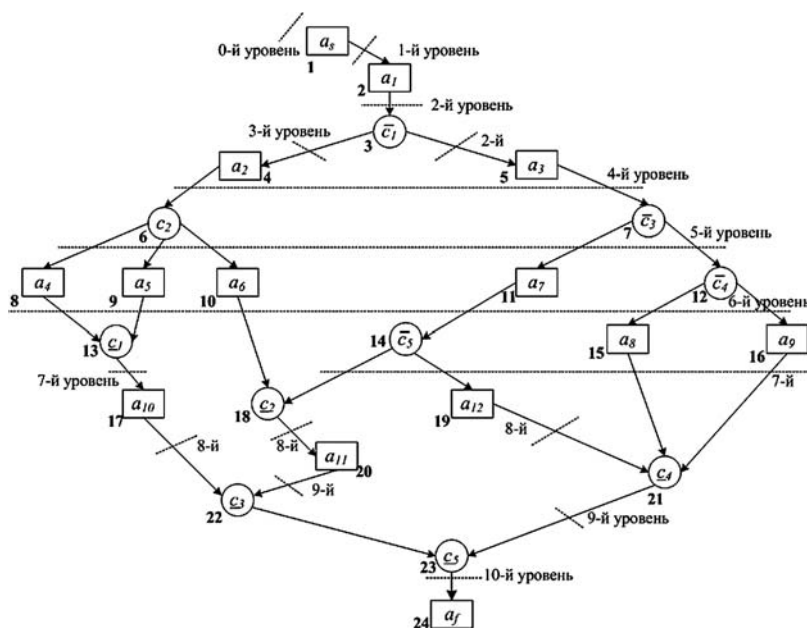


Рис. 16. Нумерация узлов WF-графа

Таблица 1

Обход по уровням и нумерация узлов сети потоков работ

0-й уровень	$a_s$ (1)				
1-й уровень	$a_1$ (2)				
2-й уровень	$\bar{c}_1$ (3)				
3-й уровень	$a_2$ (4)	$a_3$ (5)			
4-й уровень	$\bar{c}_2$ (6)	$\bar{c}_3$ (7)			
5-й уровень	$a_4$ (8)	$a_5$ (9)	$a_6$ (10)	$a_7$ (11)	$\bar{c}_4$ (12)
6-й уровень	$c_1$ (13)	$c_2^1$	$\bar{c}_5$ (14)	$a_8$ (15)	$a_9$ (16)
7-й уровень	$a_{10}$ (17)	$c_2^2$ (18)	$a_{12}$ (19)		
8-й уровень	$c_3^1$	$a_{11}$ (20)	$c_4$ (21)		
9-й уровень	$c_3^2$ (22)	$c_5$ (23)			
10-й уровень	$a_f$ (24)				

логические функции. В результате получим граф, который изображен на рис. 17.

Сделаем это, показав состояние очереди на каждом очередном шаге выполнения тела цикла *Do...While* (табл. 2). Зачеркнутые номера узлов в ячейках таблицы приведены для того, чтобы показать, что сворачиваемые узлы, несмотря на то, что на них ссылаются извлекаемые узлы, не могут быть отправлены в очередь, так как в ней (или за ее пределами) еще остались смежные с  $c$  узлы.

Выполнение каждого шага завершается извлечением узла из очереди и вычислением его статуса. Извлеченные узлы и их статусы представлены в двух последних строках табл. 2.

**Заключение**

Разработанный метод определения достижимости узлов WF-сетей дает возможность отказаться от использования традиционных методов, предусматривающих преобразование анализируемых моделей потоков работ в сети Петри. В основе метода анализ разворачивающих и сворачиваемых соединений на предмет их достижимости или недостижимости, что может иметь место для отдельных экземпляров сети. Для этого используются булевы функции, соответствующие логическим операциям разворачивающих и сворачивающих узлов. Установлены факторы, отражающие структурные особенности организации сети, и исследован механизм их влияния на содержание области определения булевых функций.

Реализация процесса с помощью разработанного метода предусматривает однократное посещение вершин графа с одновременным расчетом их

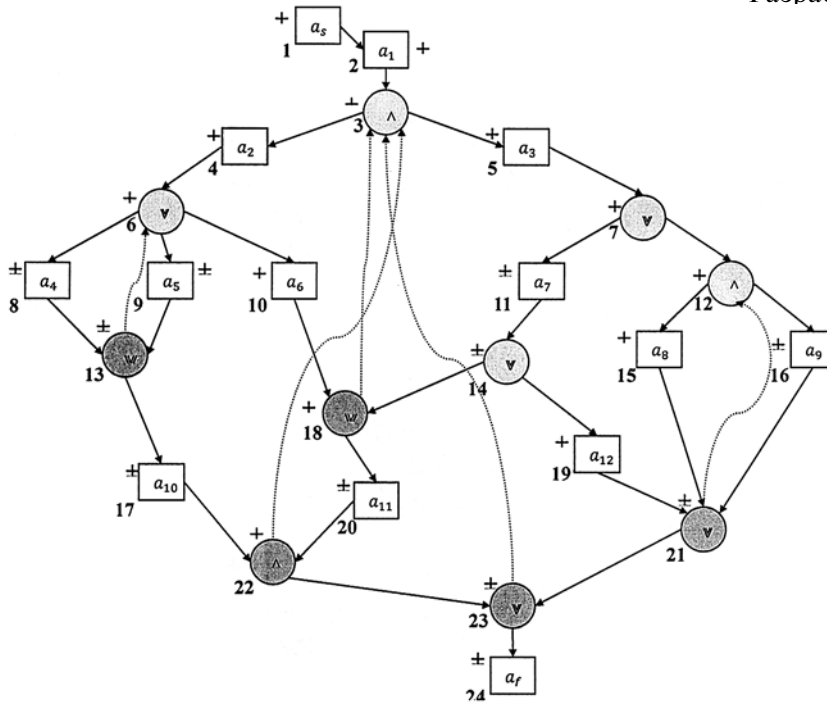


Рис. 17. Статусы узлов WF-графа

Таблица 2

Состояние очереди в процессе обхода WF-сети

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	<del>3</del>	5	<del>6</del>	<del>7</del>	10	<del>12</del>	<del>13</del>	<del>13</del>	<del>18</del>	<del>14</del>	16	17	19	<del>21</del>	<del>21</del>	<del>22</del>	20	<del>22</del>	<del>21</del>	<del>23</del>	<del>23</del>	24
			4	5	6	9	11	<del>12</del>	<del>12</del>	13	13	15	16	18	19	19	19	19	20	<del>22</del>	21		
						8	10	11	11	<del>12</del>	<del>12</del>	<del>14</del>	15	17	<del>18</del>	<del>18</del>	<del>18</del>						
						<del>7</del>	9	10	10	11		<del>13</del>	<del>14</del>	16	17	17							
						8	9							15	16								
1	2	3	4	5	6	<del>7</del>	8	9	10	11	<del>12</del>	<del>13</del>	<del>14</del>	15	16	17	<del>18</del>	19	20	<del>22</del>	<del>21</del>	<del>23</del>	24
+	+	+	+	+	+	+	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±

статуса в соответствии с предложенным оригинальным алгоритмом обхода WF-сети. Алгоритм использует двунаправленные списки примыкающих для хранения информации о структуре графа и очередь в качестве структуры для размещения узлов, посещаемых в процессе обхода.

Опираясь на полученные результаты, можно ставить задачи и развивать методы анализа сетей потоков работ, бездефектность которых предполагает достижение не только конечной точки процесса, а некоторого, наперед заданного, подмножества узлов, расположенных в произвольных точках сети, равно как и совокупности таких подмножеств, моделирующих возможные альтернативы в реализации процессов.

#### Список литературы

1. Ван дер Аалст В., ванн Хей К. Управление потоками работ: модели, методы и системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 316 с.
2. Van der Aalst W. M. P. Formalization and verification of event-driven process chains // Information and software technology. 1999. Vol. 41 (10). P. 639–650.
3. Van der Aalst W. M. P., van Hee K. M., ter Hofstede A. H. M., Sidorova N., Verbeek H. M. W., Voorhoeve M., Wynn M. T. Soundness of workflow nets: classification, decidability, and analysis // Formal aspects of computing. 2011. Vol. 23 (3). P. 333–363.
4. Verbeek H. M. W., van der Aalst W. M., ter Hofstede A. H. M. Verifying workflows with cancellation regions and OR-joins: An approach based on relaxed soundness and invariants // The computer journal. 2007. Vol. 50 (3). P. 294–314.

5. Kindler E. On the semantics of EPCs: A framework for resolving the vicious circle // Data and knowledge engineering. 2006. Vol. 56 (1). P. 23–40.

6. Wynn M. T., van der Aalst W. M. P., ter Hofstede A. H. M., Edmond D. Verifying workflows with cancellation regions and OR-joins: An approach based on reset nets and reachability analysis // Proc. of International Conference on Business Process Management (BPM 2006). Vol. 4102. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, Berlin, 2006. P. 389–394.

7. Boucheneb H., Barkaoui K. Partial order reduction for checking soundness of time workflow nets // Information sciences. 2014. Vol. 282. P. 261–276.

8. Clempner J. Verifying soundness of business processes: A decision process Petri nets approach // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. P. 5030–2040.

9. Башкин В. А., Ломазова И. А. О разрешимости бездефектности для сетей потоков работ с неограниченным ресурсом // Моделирование и анализ информационных систем. 2013. Т. 20 (4). С. 23–40.

10. Cravo G. Applications of propositional logic to workflow analysis // Applied mathematics letters. 2010. Vol. 23. P. 272–276.

11. Родионов А. Н. Некоторые синтаксические и семантические ограничения сценарных моделей бизнес-процессов // Информационные технологии. 2017. Т. 23, № 4. С. 273–281.

12. Bartak R., Rovensky V. On verification of nested workflows with extra constraints: From theory to practice // Expert systems with applications. 2014. Vol. 41, is. 3. P. 904–918.

13. Sidorova N., Stahl C., Trcka N. Soundness verification for conceptual workflow nets with data: Early detection of errors with the most precision possible // Information system. 2011. Vol. 36. P. 1026–1043.

14. Cheng A., Esparza J., Palsberg J. Complexity results for 1-safe nets // Theoretical computer science. 1995. Vol. 147, is. 1–2. P. 117–136.

DOI: 10.17587/it.24.274-288

A. N. Rodionov, D. Sci., Leading Researcher, ran@newmail.ru  
Computer Centre Of Far-Eastern Branch of RAS, Khabarovsk, Russia

## Reachability of Workflow Nodes: The Method of Structural Analysis and Algorithm

*A workflow net is a sort of directed graphs that simultaneously represent a set of ordinary graphs by means of inserting logical nodes. Such net adequately simulates any business processes configurations.*

*This article deals with a standard workflow model that composes of functional and logical nodes and satisfies several limitations with respect to net organization.*

*Gist of verifying workflow net soundness is to ascertain a fact of the whole or partial reachability or inaccessibility of activities, which are functional nodes. This issue is of immediate interest for all realms of process-aware information systems engineering. Our technique uses propositional logic and some aspects of graph theory to analyze reachability of every join and split connectors along with activities nodes. We unveil some structural configurations of a net that effect appearance or failure of activity nodes at all net instances. As a consequence a reachability issue result in a task of graph traversal and calculation of vertexes statuses. A status testifies whether a vertex can be reach or not at the whole or separate net instances. To status estimate we use Boolean functions, which meet logical operations that assign to logical nodes, with domains that are calculated on the basis of net structural parameters values. Finally, we resort to the original threading of a workflow net to improve the traversal and reachability algorithm efficiency.*

**Keywords:** business process, workflow, verification, soundness, reachability analysis

## References

1. **Van der Aalst V., Van Hej K.** *Upravljenie potokami rabot: modeli, metody i sistemy* (Workflow management: models, methods, and systems), Moscow, FIZMATLIT, 2007. 316 p.
2. **Van der Aalst W. M. P.** Formalization and verification of event-driven process chains, *Information and software technology*, 1999, vol. 41 (10), pp. 639–650.
3. **Van der Aalst W. M. P., van Hee K. M., ter Hofstede A. H. M., Sidorova N., Verbeek H. M. W., Voorhoeve M., Wynn M. T.** Soundness of workflow nets: classification, decidability, and analysis, *Formal aspects of computing*, 2011, vol. 23 (3), pp. 333–363.
4. **Verbeek H. M. W., van der Aalst W. M., ter Hofstede A. H. M.** Verifying workflows with cancellation regions and OR-joins: An approach based on relaxed soundness and invariants, *The computer journal*, 2007, vol. 50 (3), pp. 294–314.
5. **Kindler E.** On the semantics of EPCs: A framework for resolving the vicious circle, *Data and knowledge engineering*, 2006, vol. 56 (1), pp. 23–40.
6. **Wynn M. T., van der Aalst W. M. P., ter Hofstede A. H. M., Edmond D.** Verifying workflows with cancellation regions and OR-joins: An approach based on reset nets and reachability analysis, *International Conference on Business Process Management (BPM 2006)*, vol. 4102, of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Berlin, 2006, pp. 389–394.
7. **Boucheneb H., Barkaoui K.** Partial order reduction for checking soundness of time workflow nets, *Information sciences*, 2014, vol. 282, pp. 261–276.
8. **Clempner J.** Verifying soundness of business processes: A decision process Petri nets approach, *Expert Systems with Applications*, 2014, vol. 41, pp. 5030–2040.
9. **Bashkin V. A., Lomazova I. A.** O razreshimosti bezdefektnosti dlja setej potokov rabot s neogranichennym resursom, *Modelirovanie i analiz informacionnyh sistem*, 2013, vol. 20 (4), pp. 23–40. (**Bashkin V. A., Lomazova I. A.** On the Decidability of Soundness of Workflow Nets with an Unbounded Resource, *Modeling and Analysis of Information Systems*, 2013, vol. 20 (4), pp. 23–40.) (in Russian).
10. **Cravo G.** Applications of propositional logic to workflow analysis, *Applied mathematics letters*, 2010, vol. 23, pp. 272–276.
11. **Rodionov A. N.** *Nekotorye sintaksicheskie i semanticheskie ogranichenija scenarnyh modelej biznes-processov* (Some syntactic and semantic limits on scenary business process models), *Informacionnye tehnologii*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 273–281 (in Russian).
12. **Bartak R., Rovensky V.** On verification of nested workflows with extra constraints: From theory to practice, *Expert systems with applications*, 2014, vol. 41, is. 3, pp. 904–918.
13. **Sidorova N., Stahl C., Trecka N.** Soundness verification for conceptual workflow nets with data: Early detection of errors with the most precision possible, *Information System*, 2011, vol. 36, pp. 1026–1043.
14. **Cheng A., Esparza J., Palsberg J.** Complexity results for 1-safe nets, *Theoretical Computer Science*, 1995, vol. 147, is. 1–2, pp. 117–136.

---

---

### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *З. В. Наумова*.

Сдано в набор 09.02.2018. Подписано в печать 27.03.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ418. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

---