

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

**Научный журнал Российской академии наук
(издается под руководством Отделения нанотехнологий
и информационных технологий РАН)**

Издается с 1989 года
Журнал выходит ежеквартально

Учредители:

**Российская академия наук
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии наук**

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

академик РАН И. А. Соколов — председатель Редакционного совета
академик РАН Г. И. Савин
академик РАН А. Л. Стемпковский
член-корреспондент РАН Ю. Б. Зубарев
профессор Ш. Долев (S. Dolev, Beer-Sheva, Israel)
профессор Ю. Кабанов (Yu. Kabanov, Besancon, France)
профессор М. Никулин (M. Nikulin, Bordeaux, France)
профессор В. Ротарь (V. Rotar, San-Diego, USA)
профессор М. Финкельштейн (M. Finkelstein, Rostok, Germany)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

академик РАН И. А. Соколов — главный редактор
профессор, д.ф.-м.н. С. Я. Шоргин — заместитель главного редактора
д.т.н. В. Н. Захаров проф., д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков
проф., д.т.н. В. Д. Ильин д.ф.-м.н. В. И. Сеницын
проф., д.ф.-м.н. Л. А. Калиниченко проф., д.т.н. И. Н. Сеницын
проф., д.т.н. К. К. Колин к.ф.-м.н. А. К. Горшенин
проф., д.ф.-м.н. В. Ю. Королев к.ф.-м.н. С. А. Христочевский

Редакция

профессор, д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков
к.ф.-м.н. Е. Н. Арутюнов
С. Н. Стригина (ответственный секретарь)

© Федеральный исследовательский центр «Информатика
и управление» Российской академии наук, 2017

Журнал включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI),
интегрированную с Web of Science

Журнал входит в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)
Журнал включен в базу данных CrossRef (систему DOI — Digital Object Identifier),
в базу данных Ulrich's periodicals directory
и в информационную систему «Общероссийский математический портал Math-Net.Ru»

Журнал реферируется в «Реферативном журнале» ВИНТИ
и в системе Google Scholar

Журнал включен в сформированный Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

<http://www.ipiran.ru/journal/collected>

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 27 № 3 Год 2017

СОДЕРЖАНИЕ

О комплексной аутентификации А. А. Грушо, М. И. Забейло, Д. В. Смирнов, Е. Е. Тимонина	4
Анализ непротиворечивости реконфигурации программно-конфигурируемой сети А. А. Грушо, И. Ю. Терёхина	12
Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с интегральными нелинейностями (II) И. Н. Сеницын	23
Оценки погрешности аппроксимации для марковских систем обслуживания, описываемых процессами рождения и гибели с дополнительными переходами А. И. Зейфман, А. В. Коротышева, Я. А. Сатин, К. М. Киселева, Р. В. Разумчик, В. Ю. Королев, С. Я. Шоргин	37
Локальная реконструкция участков томографических изображений в параллельной и веерной схемах сканирования А. А. Кудрявцев, О. В. Шестаков, И. А. Федюшин	52
Прогнозирование развития поздних послеоперационных осложнений по результатам дискриминантного и корреляционного анализа характеристик гликемии в раннем послеоперационном периоде Т. В. Захарова, А. В. Сливкина	63
Порождение экспертно-интерпретируемых моделей для прогноза проницаемости горной породы А. М. Бочкарев, И. Л. Софронов, В. В. Стрижов	74
Некоторые неявные вопросы сетевой виртуализации В. Б. Егоров	88
Метод измерения эффекта синергии в гибридных интеллектуальных многоагентных системах И. А. Кириков, А. В. Колесников, С. В. Листопад, С. Б. Румовская	99

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 27 № 3 Год 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Алгоритм синтеза функциональных гибридных интеллектуальных систем с гетерогенным визуальным полем А. В. Колесников, С. В. Листопад	112
Геоинформационный синтез пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта С. К. Дулин, Н. Г. Дулина, Д. А. Якушев	126
Параметрическая идентификация математических моделей химической кинетики О. Г. Кантор, С. И. Спивак, Р. Р. Талипова	145
Информационно-вычислительная аналитическая система для оценки и прогнозирования коррозионных процессов на поверхности стали и алюминия М. Р. Еникеев, И. М. Губайдуллин, М. А. Малеева	155
Макетирование информационной системы для вычисления индикаторов интенсивности переноса научных знаний в сферу технологий В. А. Минин, И. М. Зацман, В. А. Хавансков, С. К. Шубников	171
Основы концепции ситуационной информатизации жизнедеятельности А. В. Ильин, В. Д. Ильин	188
Оценка кредитоспособности физического лица на основе нечеткого анализа его платежеспособности Р. Р. Рзаев, А. А. Алиев	202
Об авторах	219
Правила подготовки рукописей статей	223
Requirements for manuscripts	227

О КОМПЛЕКСНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ*

А. А. Грушо¹, М. И. Забейло², Д. В. Смирнов³, Е. Е. Тимонина⁴

Аннотация: Рассматривается проблема комплексной аутентификации. Схема комплексной аутентификации подразумевает прохождение последовательности информационных пространств. Каждое из этих пространств содержит свою информацию, способную подтвердить или опровергнуть представленные пользователем данные для своей аутентификации. Приведен пример организации использования информационных пространств для аутентификации. В каждом информационном пространстве можно построить свои модели и оценки вероятности аутентификации или ее опровержения. Интеграция различных вероятностных пространств может осуществляться за счет системы запретов, построенных на последовательностях значений данных аутентификации из разных информационных пространств.

Ключевые слова: идентификация и комплексная аутентификация; информационная безопасность

DOI: 10.14357/08696527170301

1 Введение

Спектр услуг, которые оказываются клиентам дистанционно, расширяется быстрыми темпами, поэтому подтверждение подлинности клиента становится важным элементом успеха бизнеса.

В случаях, когда учетная запись клиента скомпрометирована злоумышленниками, например украден логин/пароль клиента и совершен перевод денежных средств от его имени, ущерб для компании не ограничивается потенциальной потерей клиента. Кражи учетных записей клиентов могут подорвать имидж компании, подорвать доверие множества клиентов и ограничить рост компании в целом.

Разработка высоконадежной и «простой» для клиента аутентификации является актуальной проблемой для цифровых компаний. Для защиты учетных записей недостаточно паролей, так как пароли могут быть взломаны с помощью уже известных методов — атак по словарю и т. д.

*Работа поддержана РФФИ (проект 15-07-02053).

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, grusho@yandex.ru

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, zmizanv@ya.ru

³Сбербанк России, dvlsmirnov@sberbank.ru

⁴Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, eltimon@yandex.ru

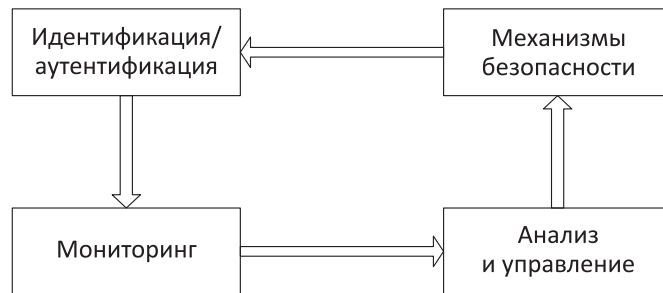


Диаграмма функционирования системы идентификации и аутентификации

Многофакторная аутентификация предоставляет дополнительный уровень защиты учетных записей путем применения дополнительных проверок подлинности клиента, например отправки СМС- или push-уведомления для подтверждения операции. Но в ряде случаев многофакторной аутентификации недостаточно. Например, в случае применения двухфакторной аутентификации клиента в приложении на мобильном устройстве, при котором второй фактор (СМС- или push-ур-уведомление) доставляется на это же устройство.

В случае заражения мобильного устройства вредоносным программным обеспечением (ПО) злоумышленник получает возможность удаленно управлять устройством, «подсматривать» вводимые логин/пароль, перекрывать экран, читать СМС- или push-уведомления, приходящие на это же устройство. Вредоносное ПО может отправлять СМС- и другие сообщения в компанию от имени клиента и без его уведомления. Иными словами, злоумышленник с помощью вредоносного ПО может распоряжаться активами клиента от его имени и без его ведома через удаленные каналы обслуживания.

Проблема аутентификации состоит в том, чтобы подтвердить заявленный пользователем информационной системе идентификатор. Основная масса работ на эту тему посвящена исследованиям качества того или иного способа аутентификации. В данной работе рассматривается проблема в комплексе. Комплексность определяется диаграммой (см. рисунок), аналог которой исследовался в работе [1].

Здесь исходные данные идентификации и аутентификации (И/А) передаются на узел анализа, результаты которого через компоненту управления механизмами безопасности формируют действия по продолжению процедуры И/А или ее остановке. Эти действия направлены на снижение рисков, которые организация может понести от неправильной И/А.

2 Информационные пространства для аутентификации

Необходимость рассмотрения многошаговой И/А связана с подключением различных информационных ресурсов, подтверждающих аутентичность пользователя. Рассмотрим примеры И/А на базе абстрактного банка.

1. Пользователь предъявляет карту и ПИН-код и пытается снять все деньги со счета. Если он никогда этого не делал, то кроме положительных сценариев (покупка, помощь) возможны и негативные (потеря/кража карты и ПИН-кода, шантаж преступниками, взятие в заложники близких людей пользователя). Противоречие с обычным поведением может вызвать запрет на одновременную выдачу требуемой суммы и организацию контакта с оператором (для выяснения психологического состояния и предложения помощи).
2. Пользователь предъявляет паспорт для получения кредита. Для значительных сумм необходимо проверить актуальность паспорта, проверить кредитную историю и т. д. Блокирование выдачи кредита происходит при любом конфликте с нормативными инструкциями. Если инструкции выполнены, но возникли подозрения, то необходимо обратиться к другим источникам информации для позитивного или негативного решения.

Таким образом, необходима углубленная идентификация для защиты интересов клиента и организации. Основная идея предлагаемого подхода состоит в том, чтобы построить семейство информационных пространств, связанных с пользователем. В них содержатся разноплановые данные, которые можно использовать для подтверждения или для выявления конфликта между последовательностью действий по И/А и априорно подготовленным, не вызывающим подозрения процессом И/А с использованием информации очередного информационного пространства. Следуя [2], последовательности, порождающие такие конфликты, будем называть запретами.

Приведем примеры информационных пространств для абстрактного банка для процесса получения денег по карте.

Пусть X_1 — множество пар (карта, ПИН-код); X_2 — множество траекторий обращения к счету (количество денег на счету, объем запрошенной суммы, дата запроса); X_3 — персональные данные, которые формируют несколько информационных подпространств:

- паспортные данные;
- профессия, место работы;
- семья, занятия членов семьи;
- биографические данные (на этой основе просто построить тесты для пользователя, отсекающие кражу карты и ПИН-кода);
- социальные связи (на этой основе можно построить тесты для выявления шантажа или взятия близких в заложники).

Обозначим через X_1, X_2, \dots последовательность информационных пространств, используемых для И/А данного пользователя. Порядок последовательности определяется целью И/А и администратором. Тогда процесс

И/А описывается последовательностью x_1, x_2, \dots , где каждый элемент последовательности принадлежит информационному пространству с соответствующим индексом.

Каждое информационное пространство описывается конечным языком возможных состояний или действиями пользователя в различных контекстах. Запрет связан с последовательностью x_1, x_2, \dots такой, что наблюдаемая последовательность противоречит любой последовательности элементов информационных пространств, которую можно считать допустимой для И/А пользователя. Ясно, что реально такая последовательность должна быть конечной (это надо доказать) и обрывается на первом серьезном запрете. Здесь надо определить, что возможны в И/А три выхода из наблюдаемой последовательности x_1, x_2, \dots , когда:

- (1) принимается положительное решение о И/А (+);
- (2) принимается решение о том, что И/А не подтверждается (–);
- (3) есть подозрения, и принимается решение о продолжении процедуры И/А с использованием следующих информационных пространств (τ).

Принятое решение передается на узел управления (см. рисунок), где разрабатываются и формируются необходимые действия информационной системы для снижения рисков организации и пользователя.

Одна из самых сложных проблем реализации предлагаемого подхода — нахождение запретов. Выше приведено описание языка представления данных И/А в виде последовательности элементов различных информационных пространств. Поскольку длины таких последовательностей конечны, но не фиксированы, то теоретически такие последовательности можно считать бесконечными или ограниченными нормативно числом T . Для целей определения запретов будем рассматривать множества уже наблюдаемых последовательностей. Реально это множество слов конечной длины, поэтому можно проводить статистическую обработку на таком множестве. Подход к определению запретов уже рассматривался в работах [3, 4]. Однако отличие рассматриваемого случая состоит в том, что в качестве исходов рассматриваются слова разной длины и в словах могут быть зависимости. Алгоритм поиска запретов состоит в следующем.

На множестве последовательностей И/А вычисляются частоты встречаемости различных слов и частичных слов (начальных участков слов). Выделяются все положительные частоты слов. Соответствующие им слова запоминаются в лексикографическом порядке. Все слова, имеющие частоту встречаемости 0, объявляются запретами.

Оценим сложность алгоритма для одного пользователя и объем словаря для слов, не являющихся запретами. Пусть максимальная длина допустимого в процессе И/А слова равна T . Число различных слов длины t равно $K(t)$. Тогда объем словаря равен $K = \sum_{t=1}^T K(t)$.

Если статистика берется по N наблюдаемым словам, то задействованная память для построения словаря содержит не более KN различных слов. Число K

не может быть большим при значительном числе пользователей, так как число сценариев И/А не может быть большим. Поэтому словарь одного пользователя считается быстро. Создание словарей для M пользователей увеличит память до MKN слов. При этом сам словарь содержит MK слов. При $K = 10$ и $M = 10\,000$ потребуется память для числа слов $100\,000$. При этом по мере наблюдения за каждым пользователем следует рассматривать увеличение множества слов с положительной И/А.

Проведем анализ рисков при работе предложенного метода. Для этого рассмотрим следующую модель. Пусть $Y_k = \prod_{i=1}^k X_i$; $D_{k,1}$ — множество всех слов длины k , на которых принимается решение (+); $D_{k,2}$ — множество всех слов длины k , на которых принимается решение (-); $D_{k,3}$ — множество всех слов длины k , на которых принимается решение продолжить И/А (τ); $L_{k,1}$ — множество наименьших запретов длины k для положительного решения (+), т. е. для векторов, лежащих в $D_{k-1,1}$, но уже не лежащих в $D_{k,1}$; $L_{k,2}$ — множество наименьших запретов длины k для решений о продолжении проверки И/А.

Для любого k и любых различных l и s $D_{k,l} \cap D_{k,s} = \emptyset$. При анализе из Y_k необходимо выбрасывать множества $\bigcup_{t=1}^k (L_{t,1} \prod_{n=t+1}^k X_n)$. С увеличением числа шагов в случае продолжения И/А снижаются риски ложной И/А. Это следует из соотношения $\bigcup_{t=1}^k L_{t,1} \subseteq \bigcup_{t=1}^{k+1} L_{t,1}$.

Обозначим через $CL_{k,1}$ множество наименьших запретов длины k из $L_{k,1}$, которые не являются реальными запретами, а возникли случайно из-за малого числа наблюдений. Случайные запреты порождают ошибку отвержения честного пользователя или усложняют процесс И/А очередными продолжениями. Можно доказать [3], что с увеличением числа наблюдений вероятность появления случайных запретов стремится к 0. К сожалению, скорость сходимости невелика, поэтому создавать множество запретов для большого числа пользователей — нереальная задача.

Однако можно искусственно увеличить число истинных запретов с помощью формирования данных в информационных пространствах. Например, элемент пространства X_k может содержать вектор ответов на вопросы, связанные с информационными ресурсами в соответствующем пространстве.

Для аутентификации необходимо провести исследования данных о пользователе в каждом информационном пространстве. Например, пусть пользователь окончил МАИ в 1980 г. и работал преподавателем основ газовой динамики. Отсюда пользователю при аутентификации можно задать следующие вопросы:

1. «Правда ли, что он окончил МАИ?»
2. «Правда ли, что он выпускник 1982 г.?»
3. «Правда ли, что он работал на предприятии по разработке авиатехники?»
4. «Правда ли, что он занимается газовой динамикой?»

Вектор истинных ответов на эти вопросы — (да, нет, нет, да). Однако вероятность выбора правильных ответов злоумышленником, не имеющим доступа

к персональным данным, равна $(1/2)^4 = 1/16$. Любой неправильный ответ является запретом.

Поскольку речь идет о формировании и использовании нескольких информационных пространств, то вероятность правильной аутентификации при указанном подходе быстро повышается. В криптографии для аутентификации без разглашения секрета [5] используется близкая идея.

Формирование информационных пространств за счет информации из социальных сетей и других баз данных позволяет существенно увеличить количество информационных пространств и благодаря этому повысить вероятность правильной аутентификации.

Можно доказать [6], что при рассмотрении бесконечных последовательностей информационных пространств обман вскрыется с вероятностью 1 на конечном шаге для большинства вероятностных моделей поведения злоумышленника.

Предложенный подход можно исследовать с помощью имитационного моделирования, что позволяет обобщить его на случай большого числа пользователей и найти оптимальные параметры И/А для всех пользователей и процессов.

3 Заключение

Комплексный подход к аутентификации понимается в том смысле, что для подтверждения подлинности идентификатора используются различные информационные ресурсы, касающиеся пользователя. Согласованность этих данных определяется рассмотрением процесса с дискретным временем информационных фрагментов из разных информационных пространств. В силу того что такие процессы не могут иметь большую длину, вместо вероятностных распределений на траекториях целесообразно использовать понятие запрета [2].

Разбиение множества запретов на классы по различной «силе» порождает расслоение множества траекторий процесса аутентификации, при этом в отдельных информационных пространствах вероятностные модели легче строить и оценивать вероятности ошибок.

Кроме того, рассмотренный подход позволяет экспериментально оптимизировать алгоритмы комплексной аутентификации с помощью имитационного моделирования.

Анализ некоторых информационных пространств можно проводить с помощью интеллектуального анализа данных на основе известных прецедентов.

Литература

1. Грушо А. А., Грушо Н. А., Забежайло М. И., Тимонина Е. Е. Интеллектуальный анализ данных в обеспечении информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы, 2016. № 3. С. 55–60.
2. Grusho A., Grusho N., Timonina E. Detection of anomalies in non-numerical data // 8th Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016. P. 273–276.

3. *Grusho A., Grusho N., Timonina E.* Criteria on statistically defined bans // 27th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings. — Alesund, Norway, 2013. P. 610–614.
4. *Грушо А. А., Грушо Н. А., Тимонина Е. Е.* Статистические методы определения запретов вероятностных мер на дискретных пространствах // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 1. С. 54–57.
5. *Грушо А., Применко Э., Тимонина Е.* Теоретические основы компьютерной безопасности. — М.: Академия, 2009. 272 с.
6. *Grusho A., Grusho N., Timonina E.* Quality of tests defined by bans // 16th Applied Stochastic Models and Data Analysis Conference (International) Proceedings. — Piraeus, Greece: ISAST, 2015. P. 289–295.

Поступила в редакцию 14.08.17

ABOUT COMPLEX AUTHENTICATION

A. A. Grusho¹, M. I. Zabezhailo¹, D. V. Smirnov², and E. E. Timonina¹

¹Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

²IT Security Department, Sberbank of Russia, 19 Vavilov Str., Moscow 117999, Russian Federation

Abstract: The problem of complex authentication is considered. The complex authentication is represented by the sequence of information spaces. Each of these spaces contains the information capable to confirm or refuse the data provided by a user for his authentication. The example of implementation of information spaces usage for authentication is given. In each information space, it is possible to construct the models and to estimate the probability of authentication or its denial. Integration of different probability spaces can be carried out on the basis of a system of bans constructed on the sequences of values of data of authentication from different information spaces.

Keywords: identification and complex authentication; information security

DOI: 10.14357/08696527170301

Acknowledgments

The paper was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-07-02053).

References

1. Grusho, A., N. Grusho, M. Zabezhailo, and E. Timonina. 2016. Intelligent data analysis in information security. *Autom. Control Comp. S.* 50(8):1–4.

2. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2016. Detection of anomalies in non-numerical data. *8th Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 273–276.
3. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2013. Criteria on statistically defined bans. *27th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings*. Alesund, Norway. 610–614.
4. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2013. Statisticheskie metody opredeleniya zapretov veroyatnostnykh mer na diskretnykh prostranstvakh [Statistical techniques of bans determination of probability measures in discrete spaces]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(1):54–57.
5. Grusho, A., Ed. Primenko, and E. Timonina. 2009. *Teoreticheskie osnovy komp'yuternoy bezopasnosti* [Theoretical bases of computer security]. Moscow: Academy. 272 p.
6. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2015. Quality of tests defined by bans. *16th Applied Stochastic Models and Data Analysis Conference (International) Proceedings*. Piraeus, Greece. 289–295.

Received August 14, 2017

Contributors

Grusho Alexander A. (b. 1946) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; grusho@yandex.ru

Zabekhailo Michael I. (b. 1956) — Candidate of Science in physics and mathematics, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; m.zabekhailo@yandex.ru

Smirnov Dmitry V. (b. 1984) — business partner for IT Security Department, Sberbank of Russia, 19 Vavilov Str., Moscow 117999, Russian Federation; dvlsmirnov@sberbank.ru

Timonina Elena E. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, professor, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; eltimon@yandex.ru

АНАЛИЗ НЕПРОТИВОРЕЧИВОСТИ РЕКОНФИГУРАЦИИ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОЙ СЕТИ*

А. А. Грушо¹, И. Ю. Терёхина²

Аннотация: Рассматривается задача реконфигурации для программно-конфигурируемых сетей (SDN, software-defined networks), которая предполагает обновление таблиц маршрутизации с учетом свойств корректности (непротиворечивости). Как правило, SDN рассматривается как ориентированный граф, а свойства непротиворечивости могут быть сформулированы различными способами. Задача реконфигурации SDN с соблюдением свойств непротиворечивости в общем случае является NP-трудной задачей. В данной работе рассматривается модель программно-конфигурируемой сети как неориентированного графа, сформулирована задача реконфигурации, обладающая свойством непротиворечивости, которое заключается в отсутствии заикливания пакетов при реконфигурации сети. Приводится алгоритм, позволяющий построить реконфигурирующую последовательность в худшем случае за квадратичное от числа вершин время.

Ключевые слова: программно-конфигурируемая сеть; задача реконфигурации; непротиворечивая реконфигурация сети

DOI: 10.14357/08696527170302

1 Введение

Программно-конфигурируемые сети — новый подход к организации компьютерных сетей, целью которого было решить существующие проблемы компьютерных сетей, обеспечивая высокую производительность и меньшую стоимость.

Главными целями создания SDN были: устранение нежелательных эффектов распределенных протоколов на уровне управления сетью (как, например, эффект заикливания пакетов) и упрощение задачи конфигурации уровня данных с учетом задач политик безопасности за счет разделения сети на уровень управления и уровень данных [1, 2].

Несмотря на поставленные цели, в SDN-сетях пакеты могут следовать по путям, нарушающим действующую политику безопасности, и заметно уменьшать

* Работа поддержана РФФИ (проект 15-29-07981 офи-м).

¹ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, grusho@yandex.ru

² Факультет вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, irinateryokhina@gmail.com

пропускную способность сети. Это происходит потому, что задачи политики безопасности касаются общего поведения сети после того, как уровень данных был уже сконфигурирован, в то время как некорректное состояние сети может возникнуть в процессе ее (ре)конфигурации [3, 4], вследствие чего работы, связанные с реконфигурацией SDN, ориентированы на решение задачи именно непротиворечивой реконфигурации.

В работах [5, 6] было показано, что задача реконфигурации сети относится к классу $co-NP$.

Возникновение же задач реконфигурации в общем случае обусловлено необходимостью пошагового преобразования между двумя решениями некоторой задачи Z таким образом, чтобы промежуточные результаты преобразования также являлись бы решениями этой задачи. Решение задачи реконфигурации позволяет найти последовательность решений задачи Z , каждое из которых отличается от предыдущего ограниченным числом изменений. В работе [7] показано, что существуют задачи реконфигурации, основанные на NP -полных задачах, которые относятся к классу $PSPACE$ -полных.

Условия непротиворечивости, которые могут требоваться при реконфигурации, могут быть различными. В работах [6, 8] были перечислены возможные условия для непротиворечивой реконфигурации сети:

- **согласованность пакетов:** множество правил, согласно которому обрабатывается отдельный пакет, должно быть или полностью старым, или полностью новым;
- **согласованность потоков:** все пакеты в одном потоке должны быть обработаны с помощью одной конфигурации сети (строгая согласованность) или префикс потока должен быть обработан одной конфигурацией, а суффикс потока должен быть обработан другой конфигурацией (слабая согласованность [5]);
- **непротиворечивость (согласованность) в конечном счете:** новое множество правил, вычисляемых контроллером, должно быть непротиворечивым. При обеспечении этого условия в процессе реконфигурации сети не гарантируется ее непротиворечивость;
- **свобода от черных дыр:** ни один пакет не должен быть потерян во время реконфигурации. Черные дыры возникают, если пакет приходит на коммутатор, на котором нет правила для его обработки;
- **свобода от перегрузок:** объем трафика, поступающего на коммутатор, не должен превышать его пропускную способность, при этом не должно происходить потери данных.

В работах [3, 6] предложено решение задачи непротиворечивой конфигурации, где условие непротиворечивости соответствует условию согласованности пакетов — каждый пакет идет или полностью по старым правилам, или полностью по новым. Решение, использующее штамповку пакетов, предложенное

в [3], обеспечивает свободу от циклов посредством добавления номеров версий в пакеты. Этот способ обеспечивает более сильное свойство согласованности пакетов, но при этом является более медленным и требует больших затрат на память. При этом во время обновления отдельного коммутатора простаивает вся сеть.

В работе [6] предложен метод реконфигурации, который обеспечивает как условие согласованности пакетов, так и условие согласованности потоков. Оба набора правил загружаются в каждый коммутатор с неиспользуемым битом в поле заголовка. Затем коммутаторы в случае необходимости устанавливают бит для того, чтобы показать, какой набор правил следует использовать для конкретного пакета. Этот метод требует значительных ресурсов коммутаторов: в таблице правил каждого коммутатора должны присутствовать данные двух конфигураций, т. е. доступная память коммутаторов делится пополам.

В работе [5] предложен метод реконфигурации сети путем загрузки промежуточного набора правил на коммутаторы. В этом подходе пакеты, обработка которых должна измениться, посылаются в контроллер (или другие хранилища пакетов) промежуточным набором правил; как только промежуточный набор правил будет полностью загружен на коммутаторы, на коммутаторы загружается новый набор правил и удерживаемые пакеты отправляются к месту назначения. Этот метод требует хранения только одного набора правил, но ведет к увеличению пропускной способности контроллера, увеличению задержки и, как следствие, к непоследовательной доставке пакетов.

В работе [9] описывается протокол, соответствующий условиям согласованности пакетов и слабой согласованности потоков, не требующий дополнительных ресурсов ни на коммутаторы, ни на отдельное хранение пакетов во время обновления. Реконфигурация происходит посредством последовательного применения правил обновлений на отдельный коммутатор.

Работы [4, 10–12] направлены на обеспечение ненулевой пропускной способности линий передачи пакетов.

Работы [13, 14] рассматривают непротиворечивую сеть с точки зрения отсутствия потерь пакетов при ее обновлении. Для случая набора правил, содержащих один пункт назначения, рассматривается дерево цели T . Каждый слой дерева обновляется последовательно один за другим, что требует числа обновлений, равного глубине этого дерева. Такой подход может достигать быстрой сходимости на ISP (Internet Service Provider) сетях и был доработан для практического использования [15].

В данной работе рассматривается задача реконфигурации таблиц маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях. Решение поставленной задачи строится с учетом свойства непротиворечивости состояний компьютерной сети, которое заключается в отсутствии закливания пакетов на каждом шаге реконфигурации. Для введенной модели сети оценивается сложность алгоритма построения непротиворечивой реконфигурации, длина соответствующей реконфигурирующей последовательности и другие свойства.

2 Основные понятия и результаты

Задача реконфигурации, как правило, имеет следующую структуру [7]:

- фиксируется некоторая задача поиска \mathbf{S} — алгоритм, который для экземпляра задачи \mathbf{I} и для предполагаемого решения y определяет, является ли y решением \mathbf{I} ;
- фиксируется отношение соседства A на множестве решений — алгоритм, который для экземпляра задачи \mathbf{I} и двух решений y, y' определяет, являются ли решения соседними.

Задача реконфигурации для \mathbf{S} и A определяется следующим образом: даны экземпляр задачи \mathbf{I} и два решения y_0, y_t , необходимо определить, существует ли последовательность решений y_0, y_1, \dots, y_t задачи \mathbf{I} такая, что y_{i-1} и y_i — соседние решения, $i = 1, 2, \dots, t$.

В данной работе будет рассматриваться задача реконфигурации программно-конфигурируемых сетей. Программно-конфигурируемая сеть, в соответствии с [8], будет рассматриваться как набор соединенных между собой маршрутизаторов и коммутаторов. Предполагается, что в отдельный момент времени на каждый коммутатор центральным контроллером загружен набор правил перенаправления, которые коммутатор может применить при получении некоторого пакета.

Определение 1. Программно-конфигурируемая сеть — неориентированный граф $G = (V, E)$, где V — множество вершин, соответствующее множеству коммутаторов и маршрутизаторов; E — множество ребер, соответствующее множеству возможных правил коммутации пакетов в сети.

Если $e = (v_1, v_2) \in E$ — некоторое ребро, то вершина $v_1 \in V$ (соответственно $v_2 \in V$) и ребро e инцидентны.

Определение 2. Пусть $E' \subseteq E$ — некоторое подмножество ребер графа G , $V' \subseteq V$ — множество вершин инцидентных ребрам из E' (т.е. $V' = \{v \in V \mid \exists u \in V, (v, u) \in E'\}$), тогда подграф $G' = (V', E')$ — *конфигурация* сети (графа) G .

Далее будут рассматриваться только конфигурации графа G . Пусть $G' = (V', E')$ и $G'' = (V'', E'')$ — две конфигурации.

Определим отношение соседства для двух конфигураций, заключающееся в изменении одного правила коммутации пакетов.

Определение 3. Две конфигурации G' и G'' — *соседние*, если получены друг из друга удалением и/или добавлением одного ребра, т.е. $0 \leq |E' \setminus E''| \leq 1$, $0 \leq |E'' \setminus E'| \leq 1$, $E' \neq E''$.

Определение 4. Последовательность конфигураций $G_0 = (V_0, E_0), \dots, G_t = (V_t, E_t)$ такую, что G_{i-1}, G_i — соседние конфигурации для $i = 1, \dots, t$,

назовем *реконфигурирующей последовательностью* конфигурации G_0 в конфигурацию G_t (реконфигурация G_0 в G_t), где t — число шагов реконфигурации.

Таким образом, задачу реконфигурации для программно-конфигурируемой сети можно определить так:

- даны две конфигурации $G' = (V', E')$ и $G'' = (V'', E'')$;
- определить, существует ли реконфигурация G' в G'' .

Для программно-конфигурируемых сетей интересно не столько получение ответа на вопрос, существует ли решение задачи реконфигурации, сколько непосредственное нахождение соответствующей реконфигурирующей последовательности, которая при этом отвечала бы запрашиваемым условиям непротиворечивости на каждом шаге реконфигурации.

Рассмотрим свойство непротиворечивости конфигурации, которое заключается в отсутствии закливания пакетов в сети.

Определение 5. Конфигурация $G' = (V', E')$ непротиворечива, если не содержит циклов.

С введенным условием непротиворечивости сети становится возможным определение корректного решения задачи реконфигурации.

Пусть $G_{\text{old}} = (V_{\text{old}}, E_{\text{old}}) = G_0$ и $G_{\text{new}} = (V_{\text{new}}, E_{\text{new}}) = G_t$ — две конфигурации такие, что существует реконфигурирующая последовательность G_0, \dots, G_t .

Определение 6. Реконфигурация G_{old} в G_{new} *непротиворечива*, если каждая конфигурация $G_i = (V_i, E_i)$, $i = 0, \dots, t$, в реконфигурирующей последовательности непротиворечива.

Покажем, что для введенной модели программно-конфигурируемой сети и условий непротиворечивости конфигурации для произвольных двух конфигураций G_{old} и G_{new} существует непротиворечивая реконфигурация.

Рассмотрим алгоритм построения реконфигурации $G_{\text{old}} = (V_{\text{old}}, E_{\text{old}})$ в $G_{\text{new}} = (V_{\text{new}}, E_{\text{new}})$, где G_{old} и G_{new} — непротиворечивые конфигурации.

Алгоритм 1

Инициализация алгоритма

1. Пусть $E_{\text{to_remove}} := E_{\text{old}} \setminus E_{\text{new}}$ и $E_{\text{to_add}} := E_{\text{new}} \setminus E_{\text{old}}$ — два вспомогательных множества ребер, которые должны быть изменены. Алгоритм работает итеративно, пока не будет построена конфигурация G_{new} .
2. $G_0 := G_{\text{old}}$.
 i -й шаг алгоритма (конфигурация G_{i-1} построена), $i = 0, 1, \dots$
1. Если $E_{\text{to_remove}} = E_{\text{to_add}} = \{\emptyset\}$, то $G_{i-1} = G_{\text{new}}$, $t := i - 1$, реконфигурация G_{old} в G_{new} построена, t — число шагов реконфигурации (длина реконфигурирующей последовательности).

2. Если $E_{\text{to_remove}} = \{\emptyset\}$ и $E_{\text{to_add}} \neq \{\emptyset\}$, то $\exists e \in E_{\text{to_add}}$ и $G_i := (V_i, E_{i-1} \cup \cup e)$, $E_{\text{to_add}} := E_{\text{to_add}} \setminus \{e\}$.
3. Если $E_{\text{to_remove}} \neq \{\emptyset\}$ и $E_{\text{to_add}} = \{\emptyset\}$, то $\exists e \in E_{\text{to_remove}}$ и $G_i := (V_i, E_{i-1} \setminus \{e\})$, $E_{\text{to_remove}} := E_{\text{to_remove}} \setminus \{e\}$.
4. Если иначе, пусть $e = (v_1, v_2) \in E_{\text{to_add}}$. Рассмотрим граф $G' = (V_{i-1} \cup \cup \{v_1, v_2\}, E_{i-1} \cup \{e\})$. Возможны 2 случая:
 - (а) G' не содержит циклов, тогда $G_i := G'$, $E_{\text{to_add}} := E_{\text{to_add}} \setminus \{e\}$;
 - (б) G' содержит цикл $L \subseteq E_{i-1} \cup \{e\}$. В цикле L существует ребро $e' \in E_{\text{to_remove}}$, тогда $G_i := (V_i, E_{i-1} \cup \{e\} \setminus \{e'\})$, $E_{\text{to_remove}} := E_{\text{to_remove}} \setminus \{e'\}$ и $E_{\text{to_add}} := E_{\text{to_add}} \setminus \{e\}$.

Теорема 1. Пусть $G_{\text{old}} = (V_{\text{old}}, E_{\text{old}})$ и $G_{\text{new}} = (V_{\text{new}}, E_{\text{new}})$ — две непротиворечивые конфигурации сети $G = (V, E)$. Тогда существует непротиворечивая реконфигурация G_{old} в G_{new} , которая в худшем случае может быть построена за $O(|V|^2)$.

Если для ориентированного графа задача поиска разрезающего циклы набора ребер является NP-полной [16], то для неориентированного графа задача может быть решена с помощью жадного алгоритма или дополнения графа до остовного дерева, что при отсутствии условия непротиворечивости на начальную и конечную конфигурации дает возможность сделать их непротиворечивыми и применить алгоритм 1 построения реконфигурирующей последовательности. Приведение некоторого графа G к его ациклическому виду требует $r = m - n + c$ удалений ребер, где m — число ребер, n — число вершин, а c — число компонент связности графа G . Оценка сложности работы алгоритма 1 в худшем случае остается справедливой.

Рассмотрим вопрос о числе шагов t непротиворечивой реконфигурации $G_{\text{old}} = (V_{\text{old}}, E_{\text{old}})$ в $G_{\text{new}} = (V_{\text{new}}, E_{\text{new}})$.

Утверждение 1. Для реконфигурации G_{old} в G_{new} , построенной с помощью алгоритма 1, справедливо

$$t \leq |E_{\text{old}} \setminus E_{\text{new}}| + |E_{\text{new}} \setminus E_{\text{old}}|.$$

Верхняя оценка достигается, когда добавление каждого нового ребра не образует цикл, что приводит к перебору всех ребер каждый раз.

Возможно оценить изменение числа компонент связности в порождаемых конфигурациях при работе алгоритма 1.

Пусть k — число компонент связности графа G_{old} ; m — число компонент связности графа G_{new} .

Утверждение 2. При построении непротиворечивой реконфигурации G_{old} в G_{new} с помощью алгоритма 1 число компонент связности l в каждой конфигу-

рации из реконфигурирующей последовательности удовлетворяет неравенству $\min\{k, m\} \leq l \leq \max\{k, m\}$.

Доказательство следует из леммы 1 и построения каждого шага алгоритма.

3 Вспомогательные утверждения и доказательства

Лемма 1. Пусть $G_{i-1} = (V_{i-1}, E_{i-1})$ – непротиворечивая конфигурация, тогда конфигурация $G_i = (V_i, E_i)$, построенная с помощью шага алгоритма 1, является непротиворечивой и соседней к конфигурации G_{i-1} .

Доказательство. После шага алгоритма 1 в построенной конфигурации G_i будет изменено одно ребро (ребро может быть удалено, добавлено новое, удалено одно ребро и добавлено другое), поэтому G_{i-1} и G_i — соседние конфигурации.

Пункт 2 шага алгоритма не может образовать цикл, если G_{new} — непротиворечивая конфигурация. Пункт 3 удаляет ребра, что также не может образовать новый цикл, так же как и первый подпункт п. 4.

Рассмотрим второй подпункт п. 4.

Покажем, что добавление ребра e к G_{i-1} может образовать только один цикл. Предположим, что при добавлении ребра e к G_{i-1} граф G' содержит 2 или более циклов L_1, \dots, L_k ($k \geq 2$).

Если ребро $e \notin L_j \forall j = 1, \dots, k$, то в G_{i-1} существовали циклы L_1, \dots, L_k ($L_1, \dots, L_k \subset G_i$), что противоречит условию непротиворечивости G_{i-1} .

Если ребро e принадлежит только циклу L_j , то аналогично $L_1, \dots, L_{j-1}, L_{j+1}, \dots, L_k \subset G_i$, что противоречит условию непротиворечивости G_{i-1} .

Пусть ребро $e = (v_1, v_2)$ содержится в двух циклах графа G' , $e \in L_1 \cap L_2$, $L_1 = v_1 e v_2 C_1 v_1$, $L_2 = v_1 e v_2 C_2 v_1$. Тогда существует «внешний» цикл $L' \subset \subset L_1 \cup L_2$, $L' = v_1 C_1 v_2 C_2 v_1$, в котором ребро e не участвует, что противоречит условию непротиворечивости G_{i-1} .

Если $e \in L_1 \cap \dots \cap L_m$, $2 < m \leq k$, то аналогично рассуждениям, когда ребро $e = (v_1, v_2)$ содержится только в двух циклах графа G' , также получаем противоречие с условием непротиворечивости G_{i-1} .

Таким образом, граф G' может содержать только один цикл, который был образован после добавления ребра $e \in E_{\text{to_add}}$. В цикле L существует ребро $e' \in E_{\text{to_remove}}$, так как иначе цикл L содержался бы в E_{new} , что противоречит условию непротиворечивости конфигурации G_{new} .

Доказательство теоремы 1. Существование непротиворечивой реконфигурации:

Согласно лемме 1 алгоритм 1 на каждом шаге строит соседнюю непротиворечивую конфигурацию к текущей. Так как множества $E_{\text{to_add}}$ и $E_{\text{to_remove}}$ конечны ($|E_{\text{to_add}}| \leq |E_{\text{new}}|$, $|E_{\text{to_remove}}| \leq |E_{\text{old}}|$) и конфигурация G_{old} непротиворечива, алгоритм строит непротиворечивую реконфигурацию G_{old} в G_{new} за конечное время.

Сложность:

Пункт 2 алгоритма делает не более $|E_{\text{new}} \setminus E_{\text{old}}|$ добавлений ребер, п. 3, соответственно, $|E_{\text{old}} \setminus E_{\text{new}}|$ удалений. В п. 4 в худшем случае $|E_{\text{new}} \setminus E_{\text{old}}|$ раз ищется подходящее ребро в цикле L , которое содержит не более $|E_{\text{new}} \cup E_{\text{old}}|$ ребер.

Таким образом, сложность алгоритма построения соседней конфигурации имеет оценку $O(|E_{\text{new}} \setminus E_{\text{old}}| + |E_{\text{old}} \setminus E_{\text{new}}| + |E_{\text{new}} \setminus E_{\text{old}}| \times (|E_{\text{new}} \cup E_{\text{old}}|))$. Так как число ребер в непротиворечивых конфигурациях, т.е. в графах без циклов, не превосходит $|V| - 1$, то в худшем случае алгоритм 1 имеет сложность $O(|V|^2)$.

4 Заключение

В работе предложена модель программно-конфигурируемой сети. Для данной модели предложено решение задачи реконфигурации с учетом свойства непротиворечивости, заключающееся в отсутствии заикливания пакетов при переходе к каждой новой конфигурации сети. Показано, что для введенной модели решение задачи непротиворечивой реконфигурации всегда существует и может быть построено за полиномиальное время.

Литература

1. Grusho A., Grusho N., Piskovski V., Timonina E. Five SDN-oriented directions in Information Security // 1st Science and Technology Conference (International) "Modern Networking Technologies." — IEEE, 2014. P. 68–71.
2. Грушо А. А., Забежайло М. И., Зацаринный А. А., Писковский В. О. Безопасная автоматическая реконфигурация облачных вычислительных сред // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 83–92.
3. Reitblatt M., Foster N., Rexford J., Schlesinger C., Walker D. Abstractions for network update // ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2012. P. 323–334.
4. Hong C. Y., Kandula S., Mahajan R., Zhang M., Gill V., Nanduri M., Wattenhofer R. Achieving high utilization with software-driven WAN // ACM SIGCOMM Comp. Com., 2013. Vol. 43. No. 4. P. 15–26.
5. McGeer R. A safe, efficient update protocol for OpenFlow networks // 1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2012. P. 61–66.
6. Reitblatt M., Foster N., Rexford J., Walker D. Software updates in openflow networks: Change you can believe in! // HotNets-X: 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2011. <http://www.cs.cornell.edu/~jnfoster/papers/consistent-updates-hotnets11.pdf>.
7. Ito T., Demaine E., Harvey N., Papadimitriou Ch., Sideri M., Uehara R., Uno Y. On the complexity of reconfiguration problems // Theor. Comput. Sci., 2011. Vol. 412. No. 12–14. P. 1054–1065.

8. Forster K. T., Mahajan R., Wattenhofer R. Consistent updates in software defined networks: On dependencies, loop freedom, and blackholes // IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops. — IEEE, 2016. P. 1–9.
9. McGeer R. A correct, zero-overhead protocol for network updates // 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2013. P. 161–162.
10. Jin X., Liu H., Gandhi R., Kandula S., Mahajan R., Rexford J., Wattenhofer R., Zhang M. Dynamic scheduling of network updates // ACM SIGCOMM Comput. Com., 2014. Vol. 44. No. 4. P. 539–550.
11. Brandt S., Forster K.-T., Wattenhofer R. Augmenting anycast network flows // 17th Conference (International) on Distributed Computing and Networking Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2016. P. 24.
12. Brandt S., Forster K.-T., Wattenhofer R. On consistent migration of flows in SDNs // IEEE INFOCOM 2016: 35th Annual IEEE Conference (International) on Computer Communications. — IEEE, 2016. P. 1–9.
13. Francois P., Filsfils C., Evans J., Bonaventure O. Achieving sub-second IGP convergence in large IP networks // ACM SIGCOMM Comput. Com., 2005. Vol. 35. No. 3. P. 35–44.
14. Francois P., Bonaventure O. Avoiding transient loops during the convergence of link-state routing protocols // IEEE ACM T. Network., 2007. Vol. 15. No. 6. P. 1280–1292.
15. Francois P., Bonaventure O. Loop-free convergence using oFIB // Internet-Draft. — IETF, 2011. <https://tools.ietf.org/html/draft-francois-ordered-fib-02>.
16. Garey M. R., Johnson D. S. Computers and intractability. A guide to the theory of NP-completeness. — New York, NY, USA: W. H. Freeman & Co., 1990. 351 p.

Поступила в редакцию 26.04.17

CONSISTENCY ANALYSIS OF SOFTWARE-DEFINED NETWORKS RECONFIGURATION

A. A. Grusho¹ and I. Yu. Teryokhina²

¹Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

²Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: The paper studies the software-defined networks (SDN) reconfiguration problem, considering presence of consistency properties while updating the route tables. Generally, SDN is represented as an oriented graph, but consistency

properties can be formulated in various ways. The SDN reconfiguration problem with respect to consistency properties is an NP-hard problem for most cases. The paper defines the SDN model as an undirected graph and formulates the reconfiguration problem for this model that satisfies the loop-free consistency property while the network updates. For the introduced model, the worst-case quadratic algorithm of building the corresponding reconfiguration sequence from one configuration to another is proposed.

Keywords: software-defined network; reconfiguration problem; consistency; network updates

DOI: 10.14357/08696527170302

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-29-07981 ofi-m).

References

1. Grusho, A., N. Grusho, V. Piskovski, and E. Timonina. 2014. Five SDN-oriented directions in information security. *12th Science and Technology Conference (International) "Modern Networking Technologies."* IEEE. 68–71.
2. Grusho, A. A., M. I. Zabezhailo, A. A. Zatsarinnyy, and V. O. Piskovski. 2016. Bezopasnaya avtomaticheskaya rekonfiguratsiya oblachnykh vychislitel'nykh sred [Secure automatic reconfiguration of cloudy computing]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):83–92.
3. Reitblatt, M., N. Foster, J. Rexford, C. Schlesinger, and D. Walker. 2012. Abstractions for network update. *ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication Proceedings.* ACM. 323–334.
4. Hong, C. Y., S. Kandula, R. Mahajan, M. Zhang, V. Gill, M. Nanduri, and R. Wattenhofer. 2013. Achieving high utilization with software-driven WAN. *ACM SIGCOMM Comp. Com.* 43(4):15–26.
5. McGeer, R. 2012. A safe, efficient update protocol for OpenFlow networks. *1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks Proceedings.* ACM. 61–66.
6. Reitblatt, M., N. Foster, J. Rexford, and D. Walker. 2011. Software updates in openflow networks: Change you can believe in! *HotNets-X: 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks Proceedings.* — New York, NY: ACM. Available at: <http://www.cs.cornell.edu/~jnfoster/papers/consistent-updates-hotnets11.pdf> (accessed April 26, 2017).
7. Ito, T., E. Demaine, N. Harvey, Ch. Papadimitriou, M. Sideri, R. Uehara, and Y. Uno. 2011. On the complexity of reconfiguration problems. *Theor. Comput. Sci.* 412(12-14):1054–1065.
8. Forster K. T., R. Mahajan, and R. Wattenhofer. 2016. Consistent updates in software defined networks: On dependencies, loop freedom, and blackholes. *IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops.* IEEE. 1–9.

9. McGeer, R. 2013. A correct, zero-overhead protocol for network updates. *2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking Proceedings*. ACM. 161–162.
10. Jin, X., H. Liu, R. Gandhi, S. Kandula, R. Mahajan, J. Rexford, R. Wattenhofer, and M. Zhang. 2014. Dynamic scheduling of network updates. *ACM SIGCOMM Comput. Com.* 44(4):539–550.
11. Brandt, S., K.-T. Forster, and R. Wattenhofer. 2016. Augmenting anycast network flows. *17th Conference (International) on Distributed Computing and Networking Proceedings*. New York, NY: ACM. 24.
12. Brandt S., K.-T. Forster, and R. Wattenhofer. 2016. On consistent migration of flows in SDNs. *IEEE INFOCOM 2016: 35th Annual IEEE Conference (International) on Computer Communications*. IEEE. 1–9.
13. Francois, P., C. Filsfils, J. Evans, and O. Bonaventure. 2005. Achieving sub-second IGP convergence in large IP networks. *ACM SIGCOMM Comput. Com.* 35(3):35–44.
14. Francois P., and O. Bonaventure. 2007. Avoiding transient loops during the convergence of link-state routing protocols. *IEEE ACM T. Network.* 15(6):1280–1292.
15. Francois, P., and O. Bonaventure. 2011. Loop-free convergence using oFIB. *Internet-Draft*. IETF. Available at: <https://tools.ietf.org/html/draft-francois-ordered-fib-02> (accessed April 26, 2017).
16. Garey, M. R., and D. S. Johnson. 1990. *Computers and intractability. A guide to the theory of NP-completeness*. New York, NY, USA: W. H. Freeman & Co. 351 p.

Received April 26, 2017

Contributors

Grusho Alexander A. (b. 1946) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, head of laboratory, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; grusho@yandex.ru

Teryokhina Irina Yu. (b. 1994) — Master student, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M.V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; irinateryokhina@gmail.com

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ИНТЕГРАЛЬНЫМИ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ (II)

*И. Н. Синецкин*¹

Аннотация: Разработано методическое и алгоритмическое обеспечение аналитического моделирования (АМ) нормальных (гауссовских) процессов в дифференциальных стохастических системах (СтС) с вероятностными интегральными нелинейностями (ВИН) на основе методов статистической линеаризации (МСЛ) и нормальной аппроксимации (МНА). Для ВИН (экспоненциального, гамма- и χ^2 -распределений) получены аналитические выражения для коэффициентов МСЛ (МНА) при степенной аппроксимации. Алгоритмы положены в основу модуля разрабатываемого инструментального программного обеспечения StS-Analysis.2017. Приведено два тестовых примера с оценкой точности.

Ключевые слова: вероятностная интегральная нелинейность (ВИН); гамма-распределение; χ^2 -распределение; интегральная нелинейность (ИН); метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); степенное разложение; стохастическая система (СтС); экспоненциальное распределение

DOI: 10.14357/08696527170303

1 Введение

В [1–3] описаны методы и инструментальные программные средства АМ нормальных процессов в СтС со сложными нелинейностями, описываемыми такими специальными функциями, как функции Бесселя целого и дробного порядка, эллиптические функции Якоби и Вейерштрасса, а также связанными с ними функциями.

В [4] рассмотрены типовые сложные интегральные нелинейности (ИН), МСЛ и МНА для дифференциальных СтС со сложными ИН. В качестве тестового примера рассмотрена динамика интегрального осциллятора в стохастической среде. Особое внимание уделено ИН, описываемым функциями Лапласа, интегралами Френеля и интегральным синусом.

Продолжим [1–4] и рассмотрим методическое и алгоритмическое обеспечение АМ нормальных стохастических процессов (СтП) в СтС с ВИН. В разд. 2–4

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sinitsin@dol.ru

рассмотрены типовые ВИН, алгоритмы МСЛ и МНА и тестовые примеры. В приложениях П1–П3 приведены аналитические выражения МСЛ для следующих ВИН: экспериментального, гамма- и χ^2 -распределений. Приложение П4 содержит необходимые сведения о функциях параболического цилиндра, лежащих в основе алгоритмов.

2 Вероятностные интегральные нелинейности и их статистическая линейаризация

Рассмотрим скалярную нестационарную ВИН следующего вида:

$$Z_t(Y_t, t) = \int_{-\infty}^{Y_t} \psi^{\text{ВИН}}(Y_t, t, \eta) d\eta, \quad (1)$$

где $\psi^{\text{ВИН}} = \psi^{\text{ВИН}}(Y_t, t, \eta)$ — скалярная детерминированная нелинейная функция отмеченных переменных типа плотности распределения случайной величины (с.в.), которая непрерывна, дифференцируема и удовлетворяет условиям:

$$Z_t(-\infty) = 0; \quad Z_t(\infty) = 1; \quad Z_t(Y) = Z_t(Y_t - 0).$$

Для приближенного представления ВИН (1) широко применяются следующие приближенные методы [5–10]:

- степенные разложения;
- система кривых Пирсона;
- ортогональные разложения по полиномам Эрмита, Чебышёва и др., ряды Грама–Шарлье, Эджуорта и др.;
- аппроксимация конечных отрезков плотности линейной комбинацией заданной функции.

Примером ВИН может служить функция Лапласа, подробно рассмотренная в [4], а также известные типовые функции распределения скалярных с.в. [5–7].

Примерами сложных скалярных ВИН могут служить многочленные и дробно-рациональные функции типовых ВИН, а также функции, получаемые путем соответствующего преобразования аргумента в ВИН.

В случае векторных и матричных ВИН имеют место соответствующие представления для компонент.

В случаях степенного и эрмитова представления ВИН (1) может быть аппроксимирована следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} Z_t &= \varphi^{\text{CT}}(Y_t, t) + R_n^{\text{CT}}, \\ \varphi^{\text{CT}}(Y_t, t) &= \varphi^+(Y_t, t)\varphi_n^-(Y_t, t), \quad \varphi_n^-(Y_t, t) = \sum_{k=0}^{n_{\text{CT}}} a_k^-(t)Y_t^k; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_t &= \varphi^{\text{эп}}(Y_t, t) + R^{\text{эп}}, \\ \varphi^{\text{эп}}(Y_t, t) &= \varphi^+(Y_t, t)\varphi_n^-(Y_t, t), \quad \varphi_n^-(Y_t, t) = \sum_{k=0}^{n_{\text{эп}}} a_k H_k(Y_t) Y_t^k, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где R_n — остаточный член, а H_k — полином Эрмита. Применим МСЛ [8–10] к аппроксимированному выражению ВИН:

$$Z_t \approx \varphi(Y_t, t). \quad (4)$$

Здесь функция (4) определяется (2) или (3).

Далее будем считать СтП Y_t действительным, несимметричным ($m_y \neq 0$) и с конечной дисперсией D_y . Тогда согласно МСЛ ВИН (4) будет, в смысле минимума средней квадратической ошибки, статистически эквивалентно выражению вида:

$$Z_t \approx \varphi_0(m_y, D_y, t) + k_1(m_y, D_y, t) Y_t^0 \quad (Y_t^0 = Y_t - m_y), \quad (5)$$

где

$$\varphi_0 = \varphi_0(m_y, D_y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\eta, t) \exp\left[-\frac{(\eta - m_y)^2}{2D_y}\right] d\eta; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} k_1 = k_1(m_y, D_y, t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} (\eta - m_y) \varphi(\eta, t) \exp\left[-\frac{(\eta - m_y)^2}{2D_y}\right] d\eta = \\ &= \frac{\partial \varphi_0(m_y, D_y, t)}{\partial D_y}. \end{aligned}$$

Для нечетных (4) формулы (5) и (6) можно представить в виде:

$$Z_t \approx k_0(m_y, D_y, t) m_y + k_1(m_y, D_y, t) Y_t^0,$$

где

$$k_0 = k_0(m_y, D_y, t) = \frac{1}{m_y \sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\eta, t) \exp\left[-\frac{(\eta - m_y)^2}{2D_y}\right] d\eta.$$

В приложениях П1–П3 приведены необходимые сведения о типовых распределениях, а также коэффициенты МСЛ при степенной аппроксимации ВИН.

3 Алгоритмы аналитического моделирования нормальных процессов в стохастических системах с вероятностными интегральными нелинейностями

Уравнения функционирования конечномерных непрерывных нелинейных систем со стохастическими возмущениями путем расширения вектора состояния СтС могут быть записаны в виде следующего векторного стохастического дифференциального уравнения Ито [4]:

$$dY_t = a^{\text{вин}}(Y_t, t) dt + b^{\text{вин}}(Y_t, t) dW_0 + \int_{R_0} c^{\text{вин}}(Y_t, t, v) P^0(dt, dv),$$

$$Y(t_0) = Y_0. \quad (7)$$

Здесь Y_t — $(p \times 1)$ -мерный вектор состояния, $Y_t \in \Delta_y$ (Δ_y — многообразие состояний); $a^{\text{вин}} = a^{\text{вин}}(Y_t, t)$ и $b^{\text{вин}} = b^{\text{вин}}(Y_t, t)$ — известные $(p \times 1)$ -мерная и $(p \times m)$ -мерная функции Y_t и t ; $W_0 = W_0(t)$ — $(r \times 1)$ -мерный винеровский СтП интенсивности $\nu_0 = \nu_0(t)$; $c^{\text{вин}} = c^{\text{вин}}(Y_t, t, v)$ — $(p \times 1)$ -мерная функция Y_t, t и вспомогательного $(q \times 1)$ -мерного параметра v ; $\int_{\Delta} dP^0(t, A)$ — центрированная пуассоновская мера, определяемая

$$\int_{\Delta} dP^0(t, A) = \int_{\Delta} dP(t, A) = \int_{\Delta} \nu_P(t, A) dt,$$

при этом принято: \int_{Δ} — число скачков пуассоновского СтП в интервале времени $\Delta = (t_1, t_2]$; $\nu_P(t, A)$ — интенсивность пуассоновского СтП $P(t, A)$; A — некоторое борелевское множество пространства R_0^q с выколотым началом. Начальное значение Y_0 представляет собой с.в., не зависящую от приращений $W_0(t)$ и $P(t, A)$ на интервалах времени, следующих за t_0 , $t_0 \leq t_1 \leq t_2$, для любого множества A .

В случае аддитивных гауссовских (нормальных) и обобщенных пуассоновских возмущений уравнение (7) принимает вид [4]:

$$\dot{Y} = a^{\text{вин}}(Y_t, t) + b_0(t)V, \quad V = \dot{W}, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (8)$$

Здесь W — СтП с независимыми приращениями, представляющий собой смесь нормального и обобщенного пуассоновского СтП.

Если существуют конечные вероятностные моменты второго порядка для моментов времени t_1 и t_2 , то уравнения МНА примут следующий вид [4]:

– для характеристических функций:

$$g_1^N(\lambda; t) = \exp \left[i\lambda^T m_t - \frac{1}{2} \lambda^T K_t \lambda \right];$$

$$g_{t_1, t_2}^N(\lambda_1, \lambda_2; t_1, t_2) = \exp \left[i\bar{\lambda}^T \bar{m}_2 - \frac{1}{2} \bar{\lambda}^T \bar{K}_2 \bar{\lambda} \right], \quad (9)$$

где

$$\bar{\lambda} = [\lambda_1^T \lambda_2^T]^T ; \quad \bar{m}_2 = [m_{t_1}^T m_{t_2}^T]^T ; \quad \bar{K}_2 = \begin{bmatrix} K(t_1, t_1) & K(t_1, t_2) \\ K(t_2, t_1) & K(t_2, t_2) \end{bmatrix} ;$$

– для математических ожиданий m_t , ковариационной матрицы K_t и матрицы ковариационных функций $K(t_1, t_2)$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t &= a_1^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) , & m_0 &= m(t_0) ; \\ \dot{K}_t &= a_2^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) , & K_0 &= K(t_0) ; \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K(t_1, t_2) a_{21}^{\text{ВИН}}(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T , & K(t_1, t_1) &= K_{t_1} . \end{aligned} \right\} (10)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$m_t = M_{\Delta_y}^{\mathcal{N}} [Y_t] ; \quad Y_t^0 = Y_t - m_t ; \quad K_t = M_{\Delta_y}^{\mathcal{N}} [Y_t^0 Y_t^{0T}] ;$$

$$K(t_1, t_2) = M_{\Delta_y}^{\mathcal{N}} [Y_{t_1}^0 Y_{t_2}^{0T}] ;$$

$$a_1^{\text{ВИН}} = a_1^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^{\mathcal{N}} [a^{\text{ВИН}}(Y_t, t)] ;$$

$$\begin{aligned} a_2^{\text{ВИН}} &= a_2^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = \\ &= a_{21}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) + a_{21}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t)^T + a_{22}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) ; \end{aligned}$$

$$a_{21}^{\text{ВИН}} = a_{21}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^{\mathcal{N}} [a^{\text{ВИН}}(Y_t, t) Y_t^{0T}] ;$$

$$a_{22}^{\text{ВИН}} = a_{22}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^{\mathcal{N}} [\bar{\sigma}^{\text{ВИН}}(Y_t, t)] ;$$

$$\sigma^{\text{ВИН}}(Y_t, t) = b^{\text{ВИН}}(Y_t, t) \nu_0(t) b^{\text{ВИН}}(Y_t, t)^T ;$$

$$\bar{\sigma}(Y_t, t) = \sigma^{\text{ВИН}}(Y_t, t) + \int_{R_0^q} c^{\text{ВИН}}(Y_t, t, v) c^{\text{ВИН}}(Y_t, t, v)^T \nu_P(t, dv) , \quad (11)$$

где $M_{\Delta_y}^{\mathcal{N}}$ — символ вычисления математического ожидания для нормальных распределений (9) на гладком многообразии Δ_y .

Для стационарных СтС нормальные стационарные СтП — если они существуют, то $m_t = m^*$, $K_t = K^*$, $K(t_1, t_2) = k(\tau)$ ($\tau = t_1 - t_2$) — определяются уравнениями [5, 7, 8]:

$$\left. \begin{aligned} a_1^{\text{ВИН}}(m^*, K^*) &= 0; \quad a_2^{\text{ВИН}}(m^*, K^*) = 0; \\ \dot{k}_\tau(\tau) &= a_{21}^{\text{ВИН}}(m^*, K^*) K^{*-1} k(\tau), \quad k(0) = K^* \quad (\forall \tau > 0); \\ k(\tau) &= k(-\tau)^T \quad (\forall \tau < 0). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

При этом необходимо, чтобы матрица $a_{21}^{\text{ВИН}}(m^*, K^*) = a_{21}^{\text{ВИН}*}$ была асимптотически устойчивой.

В случае СтС (8) уравнения МНА переходят в известные уравнения МСЛ [4]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t &= a_1^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t); \quad m_0 = m(t_0); \\ \dot{K}_t &= k_1^{\text{ВИНА}}(m_t, K_t, t) K_t + K_t k_1^{\text{ВИНА}}(m_t, K_t, t)^T + \sigma_0(t), \\ K_0 &= K(t_0); \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K(t_1, t_2) K_{t_2} k_1^{\text{ВИНА}}(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T; \quad K(t_1, t_2) = K_{t_1}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} a^{\text{ВИН}}(Y_t, t) &= a_0^{\text{ВИН}}(m_t, K_t) + k_1^{\text{ВИНА}}(m_t, K_t) Y_t^0; \\ k_1^{\text{ВИНА}}(m_t, K_t, t) &= \left[\left(\frac{\partial}{\partial m_t} \right) a_0^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t)^T \right]^T; \\ b^{\text{ВИН}}(Y_t, t) &= b_0^{\text{ВИН}}(t), \quad \sigma^{\text{ВИН}}(Y_t, t) = b_0^{\text{ВИН}}(t) \nu(t) b_0^{\text{ВИН}}(t)^T = \sigma_0^{\text{ВИН}}(t). \end{aligned}$$

При условии асимптотической устойчивости матрицы $k_1^a(m^*, K^*)$ для стационарных СтС (8) в основе МСЛ лежат уравнения (12), записанные в виде:

$$\left. \begin{aligned} a_0^{\text{ВИН}}(m^*, K^*) &= 0; \\ k_1^{\text{ВИНА}}(m^*, K^*) K^* + K^* k_1^{\text{ВИНА}}(m^*, K^*)^T + \bar{\sigma}_0^{\text{ВИН}*} &= 0; \\ \dot{k}_\tau(\tau) &= k_1^{\text{ВИНА}}(m^*, K^*) k(\tau); \quad k(0) = K^* \quad (\forall \tau > 0); \\ k(\tau) &= k(-\tau)^T \quad (\forall \tau < 0). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Таким образом, в основе методов АМ (МАМ) лежат следующие утверждения.

Теорема 3.1. Если существуют интегралы (11), то уравнения (9), (10) лежат в основе нестационарных алгоритмов МАМ для негауссовских СтС (7), а уравнения (13) — для негауссовских СтС (8).

Теорема 3.2. Если СтС (7) и (8) стационарны и существует стационарный нормальный процесс, а матрица a_{21}^* асимптотически устойчива, то уравнения (12) и (14) лежат в основе стационарных алгоритмов МАМ.

Замечание. Для гауссовских СтС алгоритмы упрощаются, если принять $c^{\text{ИН}}(Y_t, t, v) \equiv 0$ в (7) и $V = V_0, \nu^V = \nu^{V_0}$ в (8).

Для алгоритмизации МНА необходимо уметь вычислять следующие интегралы:

$$\begin{aligned} I_0^{\text{ВИНА}} &= I_0^{\text{ВИНА}}(m_t, K_t, t) = a_1^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = \mathbf{M}_{\Delta y}^{\mathcal{N}} [a^{\text{ВИН}}(Y_t, t)]; \\ I_1^{\text{ВИНА}} &= I_1^{\text{ВИНА}}(m_t, K_t, t) = a_{21}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = \mathbf{M}_{\Delta y}^{\mathcal{N}} [a^{\text{ВИН}}(Y_t, t) Y_t^{\text{OT}}]; \\ I_0^{\text{ВИН}\bar{\sigma}} &= I_0^{\text{ВИН}\bar{\sigma}}(m_t, K_t, t) = a_{22}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = \mathbf{M}^{\mathcal{N}} [\bar{\sigma}^{\text{ВИН}}(Y_t, t)], \end{aligned} \quad (15)$$

а для МСЛ достаточно вычислить первый интеграл в (15), причем интеграл $I_1^{\text{ВИНА}}$ вычисляется по формуле [4]:

$$k_1^{\text{ВИНА}} = k_1^a(m_t, K_t, t) = \left[\left(\frac{\partial}{\partial m_t} \right) I_0^{\text{ВИНА}}(m_t, K_t, t) \right]^{\text{T}}.$$

Уравнения МНА (МСЛ) содержат интегралы $I_0^{\text{ВИНА}}$, $I_1^{\text{ВИНА}}$ и $I_0^{\text{ВИН}\bar{\sigma}}$ в виде соответствующих коэффициентов, поэтому процедура вычисления интегралов должна быть согласована с методом численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений для m_t, K_t и $K(t_1, t_2)$. Эти коэффициенты допускают дифференцирование по m_t и K_t , так как под интегралом стоит сглаживающая нормальная плотность.

В [11] изложены алгоритмы дискретного аналитического и статистического моделирования типовых распределений (в том числе нормальных) в нелинейных СтС на многообразиях. Алгоритмы дискретного аналитического и статистического моделирования для СтС с ВИН, а также смешанные алгоритмы различной степени точности относительно шага интегрирования также представлены в [11].

4 Тестовые примеры

4.1. Рассмотрим алгоритмы МАМ для одномерной СтС с аддитивным шумом и χ^2 -ВИН, описываемой следующим уравнением:

$$\dot{Y}_t = a_t \int_0^{Y_t} \psi^{\chi^2}(Y_t) dY_t + b_t V_t. \quad (16)$$

Здесь

$$\psi^{\chi^2}(Y_t) = \left[2^{\nu/2} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right) \right]^{-1} Y_t^{\nu/2-1} \exp\left(-\frac{Y_t}{2}\right); \quad (17)$$

a_t и b_t — известные скалярные функции; V_t — скалярный гауссовский (нормальный) белый шум интенсивности ν_t . Уравнения МАМ стохастической динамики (16), если провести степенную аппроксимацию ВИН согласно приложению ПЗ, примут следующий вид:

$$Y_t = m_t + Y_t^0; \quad \dot{m}_t = a_t \varphi_0(m_t, D_t), \quad m_{t_0} = m_0; \quad (18)$$

$$\dot{Y}_t^0 = a_t k_1^\varphi(m_t, D_t) Y_t^0 + b_t V_t, \quad Y_{t_0}^0 = Y_0^0; \quad \dot{D}_t = 2a_t k_1^\varphi(m_t, D_t) D_t + b_t \nu_t, \quad D_{t_0} = D_0. \quad (19)$$

Входящие сюда коэффициенты МСЛ $\varphi_0(m_t, D_t)$ и $k_1^\varphi(m_t, D_t)$ определены в приложении ПЗ.

В стационарном случае, когда $a_t = a^*$, $b_t = b^*$, $\nu_t = \nu^*$ не зависят от времени, причем $a^* > 0$, стационарные значения m^* и D^* находятся из уравнений (18) и (19) при $\dot{m}^* = 0$, $\dot{D}^* = 0$,

$$\varphi_0(m^*, D^*) = 0; \quad 2a^* k_1^\varphi(m^*, D^*) D^* + b^* \nu^* = 0.$$

Как показало статистическое моделирование МАМ на основе МСЛ и степенной аппроксимации ВИН (17), в стационарном режиме при $n = 3$ точность не выше 30%, а для $n = 10$ имеем точность порядка 10%.

4.2. Для одномерной СтС с параметрическим χ^2 -ВИН при белом шуме, когда

$$\dot{Y}_t = a_{0t} + a_{1t} Y_t + \left[b_{0t} + b_{1t} \int_0^{Y_t} \psi^{\chi^2}(Y_t) dY_t \right] V_t,$$

уравнения МАМ согласно МНА примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{m}_t &= a_{0t} + a_{1t} m_t, \quad m_{t_0} = m_0; \\ \dot{D}_t &= 2a_{1t} D_t + \sigma_t, \quad D_{t_0} = D_0; \\ \sigma_t &= \left[b_{0t}^2 + b_{1t}^2 \varphi_0^{P^2}(m_y, D_y) \right] \nu_t. \end{aligned}$$

Здесь коэффициент $\varphi_0^{P^2}(m_y, D_y)$ определяется согласно приложению ПЗ.

В стационарном случае, когда $a_{1t} = a_1^* > 0$, m^* , D^* определяются из уравнений:

$$a_0^* + a_1^* m^* = 0; \quad 2a_1^* D^* + \sigma^* = 0.$$

Точность МАМ на основе МНА при $n = 2$ не выше 40%, а для $n = 10$ имеем точность порядка 20%.

5 Заключение

Разработано методическое и алгоритмическое обеспечение АМ нормальных (гауссовских) процессов в дифференциальных СтС с ВИН на основе МСЛ и МНА.

Для вероятностных интегральных нелинейностей (экспоненциального, гамма- и χ^2 -распределений) получены аналитические выражения для коэффициентов МСЛ (МНА) при их степенной аппроксимации.

Алгоритмы положены в основу модуля разрабатываемого инструментального программного обеспечения StS-Analysis.2017. Приведено два тестовых примера с оценкой точности.

Приложения

П1. Нелинейность в виде экспоненциального распределения [6]

Определения:

$$\begin{aligned} f(Y) &= \lambda e^{-\lambda Y} \mathbf{1}(Y); \\ P(Y) &= \int_{-\infty}^Y f(Y) dY = 1 - e^{-\lambda Y}; \\ Q(Y) &= 1 - P(Y) = e^{-\lambda Y}. \end{aligned}$$

Типовой интеграл [5]:

$$\int_0^{\infty} x^{\nu-1} e^{-\beta x^2 - \gamma x} dx = (2\beta)^{-\nu/2} \Gamma(\nu) \exp\left(\frac{\gamma^2}{8\beta}\right) D_{-\nu}\left(\frac{\gamma}{\sqrt{2\beta}}\right),$$

где $D_{\mu}(\cdot)$ — функция параболического цилиндра (см. приложение П4).

Коэффициенты МСЛ:

$$\begin{aligned} \varphi_0^P(m_y, D_y) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{m_y^2}{4D_y}\right) \left[D_{-1}\left(-\frac{m_y}{\sqrt{D_y}}\right) - D_{-1}\left(\left(\lambda - \frac{m_y}{\sqrt{D_y}}\right) \sqrt{D_y}\right)_P \right]; \\ k_1^P(m_y, D_y) &= \frac{\partial \varphi_0^P}{\partial m_y}(m_y, D_y); \\ \varphi_0^Q(m_y, D_y) &= \sqrt{D_y} \exp\left[\frac{\left(\lambda - m_y/\sqrt{D_y}\right)^2}{4D_y}\right] D_{-1}\left(\left(\lambda - \frac{m_y}{\sqrt{D_y}}\right) \sqrt{D_y}\right). \end{aligned}$$

П2. Нелинейность в виде гамма-распределения [6]

Определения:

$$f(Y) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} Y^{\alpha-1} e^{-\lambda Y} 1(Y);$$

$$P(Y) = \int_{-\infty}^Y f(Y) dY = \int_0^Y \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} Y^{\alpha-1} e^{-\alpha Y} dY;$$

$$Q(Y) = 1 - P(Y).$$

Коэффициенты МСЛ:

$$\varphi_0^P(m_y, D_y) = \frac{\lambda^\alpha}{\sqrt{2\pi}\Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{m_y^2}{4D_y}\right) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(\lambda)^j \Gamma(\alpha+j)}{(\alpha+j)j!} D_y^{(\alpha+j)/2} D_{-(\alpha+j)}\left(-\frac{m_y}{\sqrt{D_y}}\right);$$

$$k_1^P(m_y, D_y) = \frac{\partial \varphi_0^P(m_y, D_y)}{\partial m_y};$$

$$\varphi_0^Q(m_y, D_y) = 1 - \varphi_0^P(m_y, D_y);$$

$$k_1^Q(m_y, D_y) = \frac{\partial \varphi_0^Q(m_y, D_y)}{\partial m_y}.$$

П3. Нелинейность в виде χ^2 -распределения [6]

Определения:

$$f(Y) = \left[2^{\alpha/2} \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right]^{-1} Y^{\alpha/2-1} e^{-Y/2} 1(Y) \quad (Y = \chi^2);$$

$$P(Y) = \left[2^{\alpha/2} \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right]^{-1} \int_0^Y Y^{\alpha/2-1} e^{-Y/2} dY;$$

$$Q(Y) = 1 - P(Y).$$

Степенная аппроксимация при $\alpha = 2r + 1$:

$$P(Y) = \left(\frac{Y}{2}\right)^{\alpha/2} \frac{e^{-Y/2}}{\Gamma[(\alpha+2)/2]} \left[1 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{Y^{j+1}}{(\alpha+2)(\alpha+4)\cdots(\alpha+2j)}\right],$$

$$Q(Y) = 2Q(\sqrt{Y}) + \frac{2\sqrt{Y}}{\sqrt{2\pi}} e^{-Y/2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{Y^j}{(2j+1)!!}.$$

Степенная аппроксимация при $\alpha = 2r$:

$$P(Y) = \frac{1}{\Gamma(\alpha/2)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j (Y/2)^{\alpha/2+j}}{j!(\alpha/2+j)!};$$

$$Q(Y) = e^{-Y} \left[1 + \sum_{j=1}^{(\alpha-2)/2} \frac{Y^j}{(2j)!!} \right].$$

Аппроксимация при больших α :

$$P(Y) \approx P(X_1), \quad X_1 = \frac{Y - \alpha}{\sqrt{2\alpha}};$$

$$Q(Y) \approx Q(X_2), \quad X_2 = \sqrt{2Y} - \sqrt{2\alpha - 1}.$$

Коэффициенты МСЛ:

$$\begin{aligned} \varphi_0^P(m_y, D_y) &= \frac{\exp(-m_y^2/(4D_y)) D_y^{-(\alpha+2)/2}}{\sqrt{2\pi} 2^{\alpha/2} \Gamma[(\alpha+2)/2]} \left\{ \Gamma(\alpha/2) D_{-\alpha/2} \left(-\frac{m_y}{\sqrt{D_y}} \right) + \right. \\ &\left. + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\Gamma((\alpha/2) + j + 1)}{(\alpha+2)(\alpha+4) \cdots (\alpha+2j)} D_y^{-(j+1)/2} D_{-(\alpha/2+1+j)} \left(-\frac{m_y}{\sqrt{D_y}} \right) \right\}; \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_0^P(m_y, D_y) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Gamma(\alpha/2)} \times \\ &\times \exp \left(-\frac{m_y^2}{4D_y} \right) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j \Gamma(\alpha/2 + 1 + j)}{2^{\alpha/2+j} j! (\alpha/2 + j)!} D_y^{(\alpha+1)/2+j} D_{-(\alpha/2+1+j)} \left(-\frac{m_y}{\sqrt{D_y}} \right); \quad (21) \end{aligned}$$

$$\varphi_0^Q(m_y, D_y) = 1 \varphi_0^P(m_y, D_y). \quad (22)$$

Коэффициенты МНА для $P^2(Y)$ при степенной аппроксимации получаются на основе (20)–(22), если воспользоваться известной формулой возведения в квадрат степенного ряда [5]:

$$\left(\sum_{k=0}^{\infty} a_k X^k \right)^2 = \sum_{k=0}^{\infty} b_k X^k, \quad b_k = \sum_{k=0}^{\infty} a_k a_{n-k}.$$

П4. Функции параболического цилиндра $D_p(z)$ [6]

Определение:

$$D_p(z) = 2^{p/2} e^{-z^2/4} \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma((1-p)/2)} \Phi \left(-\frac{p}{2}, \frac{1}{2}; \frac{z^2}{2} \right) - \frac{\sqrt{2\pi} z}{\Gamma(-p/2)} \Phi \left(-\frac{1-p}{2}, \frac{3}{2}; \frac{z^2}{2} \right) \right\},$$

где $\Phi(\alpha, \beta; z)$ — вырожденная гипергеометрическая функция.

Дифференциальное уравнение для $u = D_p(z)$:

$$\frac{d^2 u}{dz^2} + \left(p + \frac{1}{2} - \frac{z^2}{4} \right) u = 0.$$

Интегральное представление:

$$D_p(z) = \frac{e^{-z^2/4}}{\Gamma(-p)} \int_0^\infty \exp\left(zx - \frac{x^2}{2} \right) x^{-(p+1)} dx.$$

Дифференциальное представление:

$$D_p(z) = (-1)^p e^{z^2/4} \frac{d^p}{dz^p} \left(e^{-z^2/4} \right).$$

Функциональные соотношения:

$$\begin{aligned} D_{p+1}(z) - zD_p(z) + pD_{p-1}(z) &= 0; \\ \frac{d}{dz} D_p(z) + \frac{1}{2} D_p(z) - pD_{p-1}(z) &= 0. \end{aligned}$$

Частные значения:

$$\begin{aligned} D_{-1}(z) &= e^{z^2/4} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \bar{\Phi} \left(\frac{z}{\sqrt{2}} \right) \right]; \\ D_{-2}(z) &= e^{z^2/4} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ z \left[1 - \bar{\Phi} \left(\frac{z}{\sqrt{2}} \right) \right] - \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-z^2/4} \right\}, \end{aligned}$$

где $\bar{\Phi}(x) = (2/\pi) \int_0^x e^{-t^2} dt$.

Асимптотические разложения ($|z| \gg 1$, $|z| \gg p$):

$$D_p(z) \approx e^{-z^2/4} z^p \left[1 - \frac{p(p-1)}{2z^2} + \frac{p(p-1)(p-2)(p-3)}{2 \cdot 4 \cdot z^4} - \dots \right].$$

Литература

1. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование распределений в динамических системах с бесселевыми нелинейностями // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 4. С. 37–47.
2. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными бесселевыми нелинейностями дробного порядка // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 25–35.
3. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с эллиптическими нелинейностями // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 3–19.

4. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с интегральными нелинейностями (I) // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 3–15.
5. *Градштейн И. С., Рыжик И. М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: ГИФМЛ, 1963. 1100 с.
6. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича, И. Стигана. — М.: Наука, 1979. 832 с.
7. *Попов Б. А., Теслер Г. С.* Вычисление функций на ЭВМ: Справочник. — Киев: Наукова думка, 1984. 599 с.
8. *Пугачёв В. С., Синицын И. Н.* Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с.
9. *Пугачёв В. С., Синицын И. Н.* Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
10. *Синицын И. Н., Синицын В. И.* Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации распределений в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
11. *Синицын И. Н.* Параметрическое статистическое и аналитическое моделирование распределений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 2. С. 4–16.

Поступила в редакцию 23.03.17

ANALYTICAL MODELING OF NORMAL PROCESSES IN STOCHASTIC SYSTEMS WITH INTEGRAL NONLINEARITIES (II)

I. N. Sinitsyn

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: General methodological and algorithmical support for analytical modeling of normal processes in differential stochastic systems (StS) with probabilistic integral nonlinearities (PIN) and Wiener and Poisson noises is presented. The support is based on the method of normal approximation (MNA) and the method of statistical linearization (MSL). Probabilistic integral nonlinearities were approximated by power and Hermite series. The MSL and MNA coefficients for PIN described by exponential, gamma, and χ^2 -distributions are presented. The necessary information about the function of the parabolic cylinder is also presented. Two test examples are considered. Some generalizations are mentioned.

Keywords: analytical modeling; χ^2 -distribution; exponential distribution; gamma-distribution; Hermite polynomial and power expansion; method of normal approximation (MNA); method of statistical linearization (MSL); probabilistic integral nonlinearities (PIN)

DOI: 10.14357/08696527170303

References

1. Sinitsyn, I. N. 2015. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy v dinamicheskikh sistemakh s besselevymi nelineynostyami [Analytical modeling of distributions in dynamical systems with Bessel nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(4):37–47.
2. Sinitsyn, I. N. 2016. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi besselevymi nelineynostyami drobnogo poryadka [Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with complex Bessel nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(3):25–35.
3. Sinitsyn, I. N. 2017. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh s ellipticheskimi nelineynostyami [Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with elliptic nonlinearities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(1):3–19.
4. Sinitsyn, I. N. 2017. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh s integral'nymi nelineynostyami [Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with integral nonlinearities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):3–15.
5. Gradshteyn, I. S., and I. M. Ryzhik. 1963. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* [Tables of integrals, sums, series, and products]. Moscow: GIFML. 1100 p.
6. Abramovich, M., and I. Stigan, eds. 1979. *Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam* [Computing of functions: Handbook]. Moscow: Nauka. 832 p.
7. Popov, B. A., and G. S. Tesler. 1984. *Vychislenie funktsiy na EVM: Spravochnik* [Handbook for special functions]. Kiev: Naukova Dumka. 599 p.
8. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester, New York, NY: John Wiley. 549 p.
9. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
10. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2013. *Lektsii po normal'noy i ellipsoidal'noy approksimatsii raspredeleniy v stokhasticheskikh sistemakh* [Lectures on normal and ellipsoidal approximation in stochastic systems]. Moscow: TORUS PRESS. 488 p.
11. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraznykh [Parametric statistical and analytical modeling of distributions in stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):4–16.

Received March 23, 2017

Contributor

Sinitsyn Igor N. (b. 1940) — Doctor of Science in technology, professor, Honored scientist of RF, principal scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sinitsin@dol.ru

ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ МАРКОВСКИХ СИСТЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ, ОПИСЫВАЕМЫХ ПРОЦЕССАМИ РОЖДЕНИЯ И ГИБЕЛИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПЕРЕХОДАМИ*

*А. И. Зейфман¹, А. В. Коротышева², Я. А. Сатин³, К. М. Киселева⁴,
Р. В. Разумчик⁵, В. Ю. Королев⁶, С. Я. Шоргин⁷*

Аннотация: Рассмотрено построение предельных характеристик неоднородных процессов рождения и гибели с возможными дополнительными переходами из нулевого состояния и в него. При этом, в отличие от ранее изученных случаев, допускается общая ситуация более медленного (неэкспоненциального) убывания интенсивностей перехода из нулевого состояния в k -е при $k \rightarrow \infty$. Для таких процессов получены оценки скорости сходимости во взвешенных нормах в случае слабой эргодичности, а также равномерные по времени оценки погрешности, получаемой при аппроксимации аналогичными усеченными процессами. В качестве примера рассмотрена неоднородная система обслуживания типа $M/M/S$ с дополнительными переходами.

Ключевые слова: неоднородный процесс; процесс рождения и гибели; аппроксимация; усечение; эргодичность; оценки; системы массового обслуживания

DOI: 10.14357/08696527170304

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (соглашение 02.a03.21.0008 от 24.06.2016) и РФФИ (проект 15-01-01698).

¹Вологодский государственный университет; Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Институт социально-экономического развития территории Российской академии наук, a_zeifman@mail.ru

²Вологодский государственный университет, a_korotysheva@mail.ru

³Вологодский государственный университет, yacovi@mail.ru

⁴Вологодский государственный университет; Российский университет дружбы народов, ksushakiseleva@mail.ru

⁵Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Российский университет дружбы народов, grazumchik@ipiran.ru

⁶Факультет вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, vkorolev@cs.msu.ru

⁷Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sshorgin@ipiran.ru

1 Введение

В данной работе рассматривается некоторый подкласс марковских цепей с непрерывным временем — неоднородные процессы рождения и гибели с дополнительными переходами из/в нулевое состояние, а именно: исследуется неоднородная марковская цепь с непрерывным временем $\{X(t), t \geq 0\}$ и пространством состояний $\mathcal{X} = \{0, 1, 2, \dots\}$ в предположении, что интенсивности переходов являются функциями, зависящими как от времени, так и от состояния процесса. Предполагается, что из состояния 0 процесс может перейти в любое состояние $i > 0$ с интенсивностью перехода $r_i(t)$, из ненулевого состояния $i > 0$ возможны переходы в состояние $(i - 1)$, $(i + 1)$ или 0 с интенсивностями соответственно $\mu_i(t)$, $\lambda_i(t)$ и $\beta_i(t)$.

Процессы такого рода применяются в исследовании марковских систем массового обслуживания (СМО) (см., например, [1–6]). При этом переходы из нулевого состояния и обратно соответствуют поступлению и потере группы требований соответствующего объема («mass arrivals when empty» и «mass exodus»).

Прямое вычисление предельных характеристик, зависящих от времени, является не самым удобным способом для анализа поведения системы, описываемой процессами с неоднородными интенсивностями, поэтому так важно иметь возможность приближенного построения основных характеристик соответствующих процессов. При этом, как и в предыдущих работах [5–9], используется метод, основанный на понятии логарифмической нормы линейного оператора и соответствующих преобразованиях редуцированной прямой системы Колмогорова.

Очевидно, что оценки эргодичности, устойчивости и аппроксимации сильно зависят от ограничений, накладываемых на интенсивности переходов процесса. С одной стороны, более жесткие ограничения позволяют получить лучшие оценки; с другой стороны, слишком жесткие условия редко выполняются в приложениях. В [5] были получены первые оценки эргодичности, устойчивости и аппроксимации в более простой ситуации, когда интенсивности переходов в нулевое состояние не зависят от текущего состояния (т. е. $\beta_i(t) = \beta(t)$ для любого i). Работа [7] посвящена рассмотрению процесса $X(t)$ с $r_i(t) = \beta_i(t) \equiv 0$ (т. е. неоднородного процесса рождения и гибели общего вида). В [8] удалось получить оценки равномерной аппроксимации для процесса $X(t)$ в случае, когда $\beta_i(t) \equiv 0$ и интенсивности $r_i(t)$ экспоненциально убывают по i , т. е. существует такое $q > 1$, что $r_i(t) \leq q^{-i}$ для любого $i > 0$.

В данной работе показано, каким образом можно получить равномерные по времени оценки погрешности аппроксимации усечениями для процесса $X(t)$ при менее жестких условиях на $r_i(t)$.

2 Описание процесса

Пусть $X(t)$, $t \geq 0$, — неоднородная марковская цепь с непрерывным временем и пространством состояний $\mathcal{X} = \{0, 1, 2, \dots\}$.

Обозначим через $p_{ij}(s, t) = \Pr\{X(t) = j | X(s) = i\}$, $i, j \geq 0$, $0 \leq s \leq t$, вероятности переходов $X(t)$, через $p_i(t) = \Pr\{X(t) = i\}$ — вероятность того, что $X(t)$ находится в состоянии i в момент времени t . Рассмотрим $\mathbf{p}(t) = (p_0(t), p_1(t), \dots)^T$ — вектор распределения вероятностей состояний в момент времени t . Далее в работе полагаем, что для $j \neq i$

$$\Pr(X(t+h) = j | X(t) = i) = \begin{cases} \lambda_i(t)h + \alpha_{ij}(t, h), & \text{если } j = i + 1, i > 0; \\ \mu_i(t)h + \alpha_{ij}(t, h), & \text{если } j = i - 1, i > 1; \\ \beta_i(t)h + \alpha_{ij}(t, h), & \text{если } j = 0, i > 1; \\ r_j(t)h + \alpha_{ij}(t, h), & \text{если } j \geq 1, i = 0; \\ (\mu_1(t) + \beta_1(t))h + \alpha_{ij}(t, h), & \text{если } j = i - 1, i = 1; \\ \alpha_{ij}(t, h) & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где все $\alpha_{ij}(t, h) = o(h)$ равномерно по i, j , т. е. $\sup_{i,j} |\alpha_{ij}(t, h)| = o(h)$.

Все интенсивности предполагаются локально интегрируемыми на промежутке $[0, \infty)$ неотрицательными функциями.

Матрица интенсивностей марковской цепи $X(t)$ имеет вид:

$$Q(t) = \begin{pmatrix} a_{00}(t) & r_1(t) & r_2(t) & r_3(t) & r_4(t) & \cdots & \cdots \\ \beta_1(t) + \mu_1(t) & a_{11}(t) & \lambda_1(t) & 0 & 0 & \cdots & \cdots \\ \beta_2(t) & \mu_2(t) & a_{22}(t) & \lambda_2(t) & 0 & \cdots & \cdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ \beta_j(t) & 0 & \ddots & \mu_j(t) & a_{jj}(t) & \lambda_j(t) & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}.$$

Пусть $a_{ij}(t) = q_{ji}(t)$ для $j \neq i$ и

$$a_{ii}(t) = - \sum_{j \neq i} a_{ji}(t) = - \sum_{j \neq i} q_{ij}(t).$$

Согласно стандартному подходу, который был описан и применен в [10, 11], предполагаем выполненным условие

$$|a_{ii}(t)| \leq L < \infty$$

при всех i и почти всех $t \geq 0$.

Тогда получаем для описания процесса прямую систему дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\frac{d\mathbf{p}(t)}{dt} = A(t) \mathbf{p}(t), \quad (1)$$

где $A(t) = Q^T(t)$ — транспонированная матрица. Далее через $\|\cdot\|$ обозначим l_1 -норму, а именно: $\|\mathbf{x}\| = \sum_i |x_i|$ и $\|B\| = \sup_j \sum_i |b_{ij}|$ для матрицы $B = (b_{ij})_{i,j=0}^\infty$. Рассмотрим Ω — множество всех стохастических векторов, т. е. l_1 -векторов с неотрицательными координатами и единичной нормой. Тогда $\|A(t)\| = 2 \sup_k |a_{kk}(t)| \leq 2L$ при почти всех $t \geq 0$. Следовательно, оператор $A(t)$ из пространства l_1 в себя ограничен при почти всех $t \geq 0$ и локально интегрируем на $[0; \infty)$. Таким образом, можно рассмотреть (1) как дифференциальное уравнение в пространстве последовательностей l_1 с ограниченным оператором.

Задача Коши для систем вида (1) имеет единственное решение при произвольном начальном условии, и $\mathbf{p}(s) \in \Omega$ влечет $\mathbf{p}(t) \in \Omega$ при $t \geq s \geq 0$.

Обозначим через $E(t, k) = E\{X(t) | X(0) = k\}$ математическое ожидание (среднее) процесса $X(t)$ в момент времени t при начальном условии $X(0) = k$.

Напомним, что процесс $X(t)$ называется *слабо эргодичным*, если $\|\mathbf{p}^*(t) - \mathbf{p}^{**}(t)\| \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ для любых начальных условий $\mathbf{p}^*(0), \mathbf{p}^{**}(0)$, где $\mathbf{p}^*(t)$ и $\mathbf{p}^{**}(t)$ — соответствующие решения системы (1).

Процесс $X(t)$ имеет *предельное среднее* $\varphi(t)$, если $\lim_{t \rightarrow \infty} (\varphi(t) - E(t, k)) = 0$ для любого k .

3 Оценки эргодичности

Для получения оценок эргодичности применим подход из [5]. Введем обозначение:

$$\beta_*(t) = \inf_i \beta_i(t),$$

тогда можно переписать прямую систему Колмогорова (1) в виде

$$\frac{d\mathbf{p}(t)}{dt} = A^*(t) \mathbf{p}(t) + \mathbf{g}(t), \quad t \geq 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{g}(t) = (\beta_*(t), 0, 0, \dots)^T$, $A^*(t) = (a_{ij}^*(t))_{i,j=0}^\infty$, а

$$a_{ij}^*(t) = \begin{cases} a_{0j}(t) - \beta_*(t) & \text{при } i = 0; \\ a_{ij}(t) & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Напомним, что число

$$\gamma(B(t))_B = \lim_{h \rightarrow +0} \frac{\|I + hB(t)\| - 1}{h}$$

называется логарифмической нормой оператора $B(t)$ в пространстве \mathcal{B} . Подробнее понятие логарифмической нормы операторной функции рассмотрено в работах [10–12]. Если \mathcal{B} — $(N + 1)$ -мерное векторное пространство с l_1 -нормой, такое что оператор $B(t)$ задается матрицей $B(t) = (b_{ij}(t))_{i,j=0}^N$, $t \geq 0$, то можно найти логарифмическую норму $B(t)$ следующим образом:

$$\gamma(B(t)) = \sup_j \left(b_{jj}(t) + \sum_{i \neq j} |b_{ij}(t)| \right), \quad t \geq 0.$$

С другой стороны, логарифмическая норма оператора $B(t)$ связана с оператором Коши $V(t, s)$ системы

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = B(t) \mathbf{x}, \quad t \geq 0,$$

следующим образом:

$$\gamma(B(t))_{\mathcal{B}} = \lim_{h \rightarrow +0} \frac{\|V(t+h, t)\| - 1}{h}, \quad t \geq 0.$$

А тогда справедлива оценка оператора Коши $V(t, s)$

$$\|V(t, s)\|_{\mathcal{B}} \leq e^{\int_s^t \gamma(B(\tau)) d\tau}, \quad 0 \leq s \leq t.$$

В рассматриваемой ситуации

$$\gamma(A^*(t)) = \sup_i \left(a_{ii}^*(t) + \sum_{j \neq i} |a_{ji}^*(t)| \right) = -\beta_*(t).$$

Если обозначить через $U^*(t, s)$ оператор Коши для (2), то $\|U^*(t, s)\| \leq e^{-\int_s^t \beta_*(\tau) d\tau}$ и, следовательно, для любых начальных условий $\mathbf{p}^*(0), \mathbf{p}^{**}(0)$ и любого $t \geq 0$ имеем:

$$\|\mathbf{p}^*(t) - \mathbf{p}^{**}(t)\| \leq e^{-\int_0^t \beta_*(\tau) d\tau} \|\mathbf{p}^*(0) - \mathbf{p}^{**}(0)\|.$$

Таким образом, справедливо следующее утверждение.

Теорема 1. Пусть выполняется условие

$$\int_0^{\infty} \beta_*(t) dt = \infty.$$

Тогда процесс $X(t)$ слабо эргодичен (в равномерной операторной топологии) и справедлива следующая оценка скорости сходимости:

$$\|\mathbf{p}^*(t) - \mathbf{p}^{**}(t)\| \leq 2e^{-\int_0^t \beta_*(\tau) d\tau}$$

для любых начальных условий $\mathbf{p}^*(0), \mathbf{p}^{**}(0)$ и любого $t \geq 0$.

Пусть D — диагональная матрица вида $D = \text{diag}(d_0, d_1, d_2, \dots)$, такая что $1 = d_0 \leq d_1 \leq \dots$. Рассмотрим соответствующее пространство последовательностей $l_{1D} = \{\mathbf{z} = (p_0, p_1, p_2, \dots)\}$, такое что $\|\mathbf{z}\|_{1D} = \|D\mathbf{z}\|_1 < \infty$. Тогда можно получить оценку логарифмической нормы операторной функции $A^*(t)$ по норме l_{1D} :

$$\gamma(A^*(t))_{1D} = \gamma(DA^*(t)D^{-1}) = \sup_i \left(a_{ii}^*(t) + \sum_{j \neq i} \left| \frac{d_j}{d_i} a_{ji}^*(t) \right| \right) = -\beta_{**}(t),$$

где

$$\beta_{**}(t) = \inf_i \left(|a_{ii}^*(t)| - \sum_{j \neq i} \left| \frac{d_j}{d_i} a_{ji}^*(t) \right| \right).$$

Теорема 2. Пусть существует последовательность $\{d_i\}$, такая что

$$\int_0^\infty \beta_{**}(t) dt = \infty.$$

Тогда справедлива следующая оценка скорости сходимости:

$$\|\mathbf{p}^*(t) - \mathbf{p}^{**}(t)\|_{1D} \leq e^{-\int_0^t \beta_{**}(\tau) d\tau} \|\mathbf{p}^*(0) - \mathbf{p}^{**}(0)\|_{1D}$$

для любых начальных условий $\mathbf{p}^*(0), \mathbf{p}^{**}(0)$ и любого $t \geq 0$.

Рассмотрим пространство последовательностей $l_{1E} = \{\mathbf{z} = (p_0, p_1, p_2, \dots)\}$ таких, что $\|\mathbf{z}\|_{1E} = \sum_{k \geq 0} k|p_k| < \infty$. Положим $W = \inf_{k \geq 1} (d_k/k)$. Тогда $W\|\mathbf{z}\|_{1E} \leq \|\mathbf{z}\|_{1D}$.

Следствие 1. Пусть условия теоремы 2 выполняются и $W > 0$. Тогда процесс $X(t)$ имеет предельное среднее $\phi(t) = \mathbf{E}(t, 0)$ и справедлива следующая оценка скорости сходимости:

$$|\mathbf{E}(t, j) - \mathbf{E}(t, 0)| \leq \frac{1 + d_j}{W} e^{-\int_0^t \beta_{**}(\tau) d\tau}$$

для любого начального j и любого $t \geq 0$.

4 Аппроксимация

Рассмотрим усеченный процесс $X_N(t)$ с пространством состояний $E_N = \{0, 1, \dots, N\}$ и соответствующей транспонированной матрицей интенсивностей $A_N(t)$. Далее будем отождествлять конечный вектор $(a_0, a_1, \dots, a_N)^T$ и бесконечный вектор с теми же первыми N координатами, а остальными — равными нулю. Обозначим через $\mathbf{y}_N(t)$ вектор вероятностей состояний для усеченного процесса. Рассмотрим усеченную систему, соответствующую системе (2):

$$\frac{d\mathbf{y}_N(t)}{dt} = A_N^*(t)\mathbf{y}_N(t) + \mathbf{g}_N(t), \quad (3)$$

где $A_N^*(t)$ — матрица, полученная усечением матрицы $A^*(t)$.
Перепишем систему (3) в виде:

$$\frac{d\mathbf{y}_N(t)}{dt} = A^*(t)\mathbf{y}_N(t) + \mathbf{g}(t) + (A_N^*(t) - A^*(t))\mathbf{y}_N(t).$$

Решения систем (2) и (3) имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}(t) &= U^*(t, 0)\mathbf{p}(0) + \int_0^t U^*(t, \tau)\mathbf{g}(\tau) d\tau, \\ \mathbf{y}_N(t) &= U^*(t, 0)\mathbf{y}_N(0) + \int_0^t U^*(t, \tau)\mathbf{g}(\tau) d\tau + \\ &\quad + \int_0^t U^*(t, \tau)(A_N^*(\tau) - A^*(\tau))\mathbf{y}_N(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Пусть начальные условия для обоих процессов совпадают, т. е. $\mathbf{y}_N(0) = \mathbf{p}(0)$. Тогда в любой норме справедливо неравенство:

$$\|\mathbf{p}(t) - \mathbf{y}_N(t)\| \leq \int_0^t \|U^*(t, \tau)\| \|(A_N^*(\tau) - A^*(\tau))\mathbf{y}_N(\tau)\| d\tau. \quad (4)$$

Предположим, что существуют положительные M и a такие, что

$$\|U^*(t, \tau)\| \leq e^{-\int_\tau^t \beta_*(u) du} \leq M e^{-a(t-\tau)}, \quad (5)$$

а также что для некоторых положительных M_1 и a_1 справедлива оценка:

$$\|U^*(t, \tau)\|_{1D} \leq e^{-\int_{\tau}^t \beta_{**}(u) du} \leq M_1 e^{-a_1(t-\tau)}.$$

Выберем $\theta = \sup_t \beta_*(t)$. Тогда получаем следующую оценку:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{p}(t)\|_{1D} &= \left\| U^*(t, 0) \mathbf{p}(0) + \int_0^t U^*(t, \tau) \mathbf{g}(\tau) d\tau \right\| \leq \|U^*(t, 0)\|_{1D} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D} + \\ &+ \int_0^t \|U^*(t, \tau)\|_{1D} \|\mathbf{g}(\tau)\|_{1D} d\tau \leq M_1 e^{-a_1 t} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D} + \frac{M_1 \theta}{a_1}. \end{aligned}$$

Учитывая, что $\|U_N^*(t, s)\|_{1D} \leq \|U^*(t, s)\|_{1D}$ и $\mathbf{g}_N(\tau) = \mathbf{g}(\tau)$, можно оценить решение системы (3) следующим образом:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{y}_N(t)\|_{1D} &\leq \|U_N^*(t, 0) \mathbf{y}_N(0)\| + \int_0^t \|U_N^*(t, \tau) \mathbf{g}_N(\tau)\| d\tau \leq \\ &\leq \|U^*(t, 0)\|_{1D} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D} + \int_0^t \|U^*(t, \tau)\|_{1D} \|\mathbf{g}(\tau)\|_{1D} d\tau \leq \\ &\leq M_1 e^{-a_1 t} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D} + \frac{M_1 \theta}{a_1}, \end{aligned}$$

а отсюда имеем:

$$p_N(t) = \frac{d_N p_N(t)}{d_N} \leq \frac{\|\mathbf{y}_N(t)\|_{1D}}{d_N} \leq \frac{M_1 \theta}{a_1 d_N} + \frac{M_1 e^{-a_1 t}}{d_N} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D}. \quad (6)$$

Далее рассмотрим разность $A^*(\tau) - A_N^*(\tau)$:

$$A^*(\tau) - A_N^*(\tau) = \begin{pmatrix} -\sum_{n \geq N+1} r_n & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \beta_{N+1} - \beta_* & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & -\lambda_N & \mu_{N+1} & 0 & \vdots \\ r_{N+1} & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \lambda_N & a_{N+1, N+1} & \mu_{N+2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \lambda_{N+1} & \ddots & \vdots \end{pmatrix}.$$

Для $(\mathbf{A}^*(\tau) - \mathbf{A}_N^*(\tau)) \mathbf{y}_N$ имеем:

$$(\mathbf{A}^*(\tau) - \mathbf{A}_N^*(\tau)) \mathbf{y}_N = \begin{pmatrix} -\sum_{n \geq N+1} r_n y_0 \\ 0 \\ \vdots \\ -\lambda_N y_N \\ r_{N+1} y_0 + \lambda_N y_N \\ r_{N+2} y_0 \\ \vdots \end{pmatrix}.$$

Тогда, воспользовавшись оценкой (6), получаем:

$$\begin{aligned} \|(A_N^*(\tau) - A^*(\tau)) \mathbf{y}_N(\tau)\| &\leq 2 \sum_{n \geq N+1} r_n p_0 + 2\lambda_N p_N \leq \\ &\leq 2R_{N+1} + \frac{2M_1 L}{d_N} \left(\frac{\theta}{a_1} + e^{-a_1 t} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где R_{N+1} — остаток сходящегося ряда $\sum_n^\infty r_n$.

Таким образом, используя условия (4) и (5), с учетом (7) получаем следующую оценку погрешности аппроксимации:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{p}(t) - \mathbf{y}_N(t)\| &\leq \\ &\leq \left(2MR_{N+1} + \frac{2MM_1 L}{d_N} \left(\frac{\theta}{a_1} + e^{-a_1 t} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D} \right) \right) \int_0^t e^{-a(t-\tau)} d\tau \leq \\ &\leq \frac{2MR_{N+1}}{a} + \frac{2MM_1 L}{ad_N} \left(\frac{\theta}{a_1} + e^{-a_1 t} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D} \right). \end{aligned}$$

Теорема 3. Пусть условия теорем 1 и 2 выполняются. Тогда для любых начальных условий $\mathbf{p}(0) = \mathbf{y}_N(0)$ и любого $t \geq 0$ справедлива следующая оценка погрешности аппроксимации:

$$\|\mathbf{p}(t) - \mathbf{y}_N(t)\| \leq \frac{2MR_{N+1}}{a} + \frac{2MM_1 L}{ad_N} \left(\frac{\theta}{a_1} + e^{-a_1 t} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D} \right).$$

Чтобы найти оценку среднего для усеченного процесса, рассмотрим координаты вектора $\mathbf{p}(t)$. Имеем:

$$\begin{aligned}
 & p_{N+1} + 2p_{N+2} + 3p_{N+3} + \dots \leq \\
 & \leq \frac{1}{d_{N+1}} d_{N+1} p_{N+1} + \frac{2}{d_{N+2}} d_{N+2} p_{N+2} + \frac{3}{d_{N+3}} d_{N+3} p_{N+3} + \dots \leq \\
 & \leq \|\mathbf{p}(t)\|_{1D} \sup_{i \geq 1} \frac{i}{d_{N+i}}. \quad (8)
 \end{aligned}$$

Из (8) получаем оценку

$$\begin{aligned}
 |\mathbf{E}(t, k) - \mathbf{E}_N(t, k)| & \leq \|\mathbf{p}(t) - \mathbf{y}_N(t)\|_{1E} < \\
 & < |p_0 - p_{N0}| + |p_1 - p_{N1}| + 2|p_2 - p_{N2}| + \dots \\
 \dots + N|p_N - p_{NN}| & + (N+1)p_{N+1} + (N+2)p_{N+2} + (N+3)p_{N+3} + \dots \leq \\
 & \leq N\|\mathbf{p}(t) - \mathbf{y}_N(t)\| + p_{N+1} + 2p_{N+2} + 3p_{N+3} + \dots.
 \end{aligned}$$

Следствие 2. Пусть выполняются условия теоремы 3 и, кроме того, ряд $\sum_n nr_n$ сходится. Тогда для любых начальных условий $X(0) = X_N(0) = k$ и любого $t \geq 0$ справедлива следующая оценка погрешности аппроксимации:

$$\begin{aligned}
 |\mathbf{E}(t, k) - \mathbf{E}_N(t, k)| & \leq \frac{2NMR_{N+1}}{a} + \\
 & + \left(\frac{2NMM_1L}{ad_N} + \sup_{i \geq 1} \frac{i}{d_{N+i}} \right) \left(\frac{\theta}{a_1} + e^{-a_1 t} \|\mathbf{p}(0)\|_{1D} \right),
 \end{aligned}$$

где $\|\mathbf{p}(0)\|_{1D} = d_k$.

5 Пример

Рассмотрим число требований в системе обслуживания типа $M_t/M_t/S$ с дополнительными возможностями поступления групп требований в случае пустой очереди и возможностью потери всех требований, предполагая что интенсивности имеют следующий вид:

- поступление нового требования в систему — $\lambda(t)$;
- поступление группы размера n в пустую систему обслуживания — $g_n r(t)$;
- обслуживание требования сервером — $\mu(t)$;
- катастрофы (потери одновременно всех n требований) в системе — $\beta_n(t)$.

Рассмотрим следующие три предельных характеристики системы: предельную вероятность отсутствия требований в СМО $p_0(t)$, предельную вероятность «отсутствия очереди» в системе $\Pr(X(t) \leq S) = \sum_{i=0}^S p_i(t)$, а также предельное среднее число требований в СМО $\mathbf{E}(t, 0)$.

Для определенности будем считать, что $S = 20$, а интенсивности имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda_n(t) &= \lambda(t) = 15(1 + \sin 2\pi t); \\ \mu_n(t) &= \min(n, S)\mu(t) = \min(n, 20)(1 - \sin 2\pi t); \\ \beta_n(t) &= 2 + \cos 2\pi t + \frac{1}{n}; \\ r_n(t) &= \frac{1 + \sin 2\pi t}{n^{10}}. \end{aligned}$$

Тогда условия теоремы 1 выполнены, $X(t)$ экспоненциально слабо эргодичен и имеет предельные 1-периодические характеристики, причем

$$\|\mathbf{p}^*(t) - \mathbf{p}^{**}(t)\| \leq 2e^{-\int_0^t \beta(\tau) d\tau} \leq 4e^{-2t}$$

при любых начальных условиях $\mathbf{p}^*(0)$, $\mathbf{p}^{**}(0)$ и любом $t \geq 0$.

Полагая $d_n = (9/8)^n$, если $n < 200$, $d_n = (9/8)^{200}(n+1)/200$, если $n \geq 200$, можно вычислить:

$$\begin{aligned} L &= 74; \quad M = e^{1/\pi}; \quad a = 2; \\ \beta_{**}(t) &= \frac{17}{72} + \cos 2\pi t - \frac{143}{72} \sin 2\pi t. \end{aligned}$$

Далее, $a_1 = 0,2$, $M_1 = e^{3/\pi}$, а значит, получаем

$$|\mathbf{E}(t, j) - \mathbf{E}(t, 0)| \leq 3(d_j + 1)e^{-0,2t}$$

для любых j и $t \geq 0$.

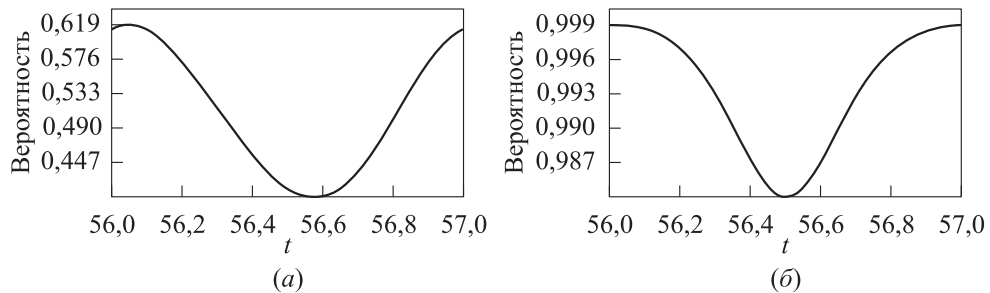


Рис. 1 Предельная вероятность отсутствия требований в системе $\Pr(X(t) = 0)$ (а) и «отсутствия очереди» в системе $\Pr(\bar{X}(t) \leq S)$ (б) на отрезке $[56, 57]$

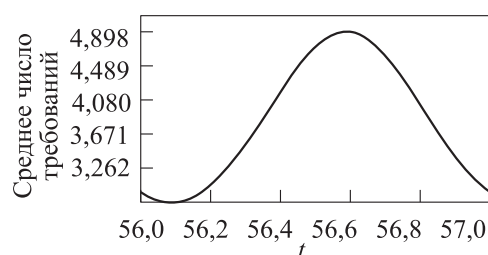


Рис. 2 Предельное среднее число требований в системе $E(t, 0)$ на отрезке $[56, 57]$

Теперь из теоремы 3 и следствия 2 получаем на отрезке $t \in [56, 57]$ следующие оценки:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{p}(t) - \mathbf{y}_N(t)\| &\leq 3 \cdot 10^{-8}; \\ |E(t, 0) - E_N(t, 0)| &\leq 6 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Соответствующие графики $\Pr(X(t) = 0)$, $\Pr(X(t) \leq S)$ и $E(t, 0)$ приведены на рис. 1 и 2.

Литература

1. *Chen A. Y., Renshaw E.* The $M/M/1$ queue with mass exodus and mass arrives when empty // *J. Appl. Prob.*, 1997. Vol. 34. P. 192–207.
2. *Chen A. Y., Renshaw E.* Markov bulk-arriving queues with state-dependent control at idle time // *Adv. Appl. Probab.*, 2004. Vol. 36. P. 499–524.
3. *Chen A. Y., Pollett P., Li J. P., Zhang H. J.* Markovian bulk-arrival and bulk-service queues with state-dependent control // *Queueing Syst.*, 2010. Vol. 64. P. 267–304.
4. *Li J. P., Chen A. Y.* The decay parameter and invariant measures for Markovian bulk-arrival queues with control at idle time // *Methodol. Comput. Appl.*, 2013. Vol. 15. P. 467–484.
5. *Zeifman A., Korotysheva A., Satin Y., Korolev V., Shorgin S., Razumchik R.* Ergodicity and perturbation bounds for inhomogeneous birth and death processes with additional transitions from and to origin // *Int. J. Appl. Math. Comp.*, 2015. Vol. 25. P. 787–802.
6. *Zhang L., Li J.* The $M/M/c$ queue with mass exodus and mass arrivals when empty // *J. Appl. Probab.*, 2015. Vol. 52. P. 990–1002.
7. *Zeifman A., Satin Ya., Korolev V., Shorgin S.* On truncations for weakly ergodic inhomogeneous birth and death processes // *Int. J. Appl. Math. Comp.*, 2014. Vol. 24. P. 503–518.
8. *Zeifman A. I., Korotysheva A. V., Korolev V. Yu., Satin Ya. A.* Truncation bounds for approximations of inhomogeneous continuous-time Markov chains // *Theor. Probab. Appl.*, 2016. Vol. 61. P. 563–569.

9. Зейфман А. И., Сатин Я. А., Коротышева А. В., Королев В. Ю., Бенинг В. Е. О классе систем обслуживания, описываемых неоднородными процессами рождения и гибели с дополнительными переходами // Докл. РАН, 2016. Т. 470. № 2. С. 129–132.
10. Granovsky B. L., Zeifman A. I. Nonstationary queues: Estimation of the rate of convergence // Queueing Syst., 2004. Vol. 46. P. 363–388.
11. Zeifman A., Leorato S., Orsingher E., Satin Ya., Shilova G. Some universal limits for nonhomogeneous birth and death processes // Queueing Syst., 2006. Vol. 52. P. 139–151.
12. Van Doorn E. A., Zeifman A. I., Panfilova T. L. Bounds and asymptotics for the rate of convergence of birth-death processes // Theor. Probab. Appl., 2010. Vol. 54. P. 97–113.

Поступила в редакцию 30.06.17

TRUNCATION BOUNDS FOR A CLASS OF INHOMOGENEOUS BIRTH AND DEATH QUEUEING MODELS WITH ADDITIONAL TRANSITIONS

A. I. Zeifman^{1,2,3}, A. V. Korotysheva¹, Ya. A. Satin¹, K. M. Kiseleva^{1,4},
R. V. Razumchik^{2,4}, V. Yu. Korolev^{2,5}, and S. Ya. Shorgin²

¹Vologda State University, 15 Lenin Str., Vologda 160000, Russian Federation

²Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

³ISED T RAS, 56-A Gorky Str. Vologda 160001, Russian Federation

⁴Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation

⁵Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: The paper considers the computation of limiting characteristics for a class of inhomogeneous birth-death processes with possible transitions from and to origin. The authors study the general situation of the slower (nonexponential) decreasing of intensities of transitions from state 0 to state k as $k \rightarrow \infty$. The authors consider the situation of weak ergodicity and obtain bounds on the rate of convergence in weighted norm and, moreover, uniform in time bounds on the rate of approximations by truncated processes. The inhomogeneous $M/M/S$ queueing model with additional transitions is studied as an example.

Keywords: inhomogeneous process; birth-death process; approximations; truncations; ergodicity; bounds; queueing systems

DOI: 10.14357/08696527170304

Acknowledgments

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement 02.a03.21.0008 dated 24.06.2016) and the Russian Foundation for Basic Research (project 15-01-01698).

References

1. Chen, A. Y., and E. Renshaw. 1997. The $M/M/1$ queue with mass exodus and mass arrives when empty. *J. Appl. Prob.* 34:192–207.
2. Chen, A. Y., and E. Renshaw. 2004. Markov bulk-arriving queues with state-dependent control at idle time. *Adv. Appl. Probab.* 36:499–524.
3. Chen, A. Y., P. Pollett, J. P. Li, and H. J. Zhang. 2010. Markovian bulk-arrival and bulk-service queues with state-dependent control. *Queueing Syst.* 64:267–304.
4. Li, J. P., and A. Y. Chen. 2013. The decay parameter and invariant measures for Markovian bulk-arrival queues with control at idle time. *Methodol. Comput. Appl.* 15:467–484.
5. Zeifman, A. I., A. V. Korotysheva, Ya. A. Satin, V. Yu. Korolev, S. Ya. Shorgin, and R. V. Razumchik. 2015. Ergodicity and perturbation bounds for inhomogeneous birth and death processes with additional transitions from and to origin. *Int. J. Appl. Math. Comp.* 25:787–802.
6. Zhang, L., and J. P. Li. 2015. The $M/M/c$ queue with mass exodus and mass arrivals when empty. *J. Appl. Probab.* 52:990–1002.
7. Zeifman, A. I., Y. A. Satin, V. Yu. Korolev, and S. Ya. Shorgin. 2014. On truncations for weakly ergodic inhomogeneous birth and death processes. *Int. J. Appl. Math. Comp.* 24:503–518.
8. Zeifman, A. I., A. V. Korotysheva, V. Yu. Korolev, and Ya. A. Satin. 2016. Truncation bounds for approximations of inhomogeneous continuous-time Markov chains. *Theor. Probab. Appl.* 61:563–569.
9. Zeifman, A. I., Y. A. Satin, A. V. Korotysheva, V. Yu. Korolev, and V. E. Bening. 2016. On a class of Markovian queuing systems described by inhomogeneous birth-and-death processes with additional transitions. *Dokl. Math.* 94:502–505.
10. Granovsky, B. L., and A. I. Zeifman. 2004. Nonstationary queues: Estimation of the rate of convergence. *Queueing Syst.* 46:363–388.
11. Zeifman, A. I., S. Leorato, E. Orsingher, Y. A. Satin, and G. N. Shilova. 2006. Some universal limits for nonhomogeneous birth and death processes. *Queueing Syst.* 52:139–151.
12. Van Doorn, E. A., A. I. Zeifman, and T. L. Panfilova. 2010. Bounds and asymptotics for the rate of convergence of birth-death processes. *Theor. Probab. Appl.* 54:97–113.

Received June 30, 2017

Contributors

Zeifman Alexander I. (b. 1954) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Head of Department, Vologda State University, 15 Lenin Str., Vologda

160000, Russian Federation; senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; principal scientist, ISEDT RAS, 56-A Gorky Str., Vologda 160001, Russian Federation; a_zeifman@mail.ru

Korotysheva Anna V. (b. 1988) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Vologda State University, 15 Lenin Str., Vologda 160000, Russian Federation; a_korotysheva@mail.ru

Satin Yakov A. (b. 1978) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Vologda State University, 15 Lenin Str., Vologda 160000, Russian Federation; yacovi@mail.ru

Kiseleva Kseniia M. (b. 1992) — PhD student, Vologda State University, 15 Lenin Str., Vologda 160000, Russian Federation; junior scientist, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; ksushakiseleva@mail.ru

Razumchik Rostislav V. (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; associate professor, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; rrazumchik@ipiran.ru

Korolev Victor Yu. (b. 1954) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Head of the Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; vkorolev@cs.msu.su

Shorgin Sergey Ya. (b. 1952) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor; Deputy Director, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS); principal scientist, Institute of Informatics Problems, FRC CSC RAS, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sshorgin@ipiran.ru

ЛОКАЛЬНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ УЧАСТКОВ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ И ВЕЕРНОЙ СХЕМАХ СКАНИРОВАНИЯ*

А. А. Кудрявцев¹, О. В. Шестаков², И. А. Федюшин³

Аннотация: Томографические методы реконструкции изображений объектов широко используются в самых разнообразных областях, включая медицину, биологию, физику плазмы, газовую динамику, геофизику, астрономию и радиолокацию. В некоторых приложениях невозможно (или нежелательно) получить полный набор проекционных данных для восстановления изображения всего объекта. Иногда интерес представляет лишь участок изображения (часто небольшой по сравнению с изображением всего объекта), и возникает задача локальной реконструкции по неполному набору проекций. Одним из самых популярных методов решения этой задачи является вейвлет-разложение, которое позволяет локально восстановить мелкие структуры изображения. Метод вейвлет-разложения применим для параллельной схемы томографического сканирования. В веерной схеме обычно используется метод перегруппировки проекций, позволяющий применять алгоритмы реконструкции, разработанные для параллельной схемы. В работе рассматривается вопрос об изменении необходимого объема проекционных данных при переходе от веерной к параллельной схеме.

Ключевые слова: преобразование Радона; вейвлеты; локальная реконструкция; веерная схема сканирования; параллельная схема сканирования

DOI: 10.14357/08696527170305

1 Введение

Методы вейвлет-анализа широко применяются при решении задач вычислительной томографии [1–3]. Помимо подавления шума вейвлет-методы кратномасштабного анализа (КМА) также используются для локальной реконструкции участков томографических изображений, что особенно важно для задач медицинской диагностики, в которых нежелательно подвергать пациентов излишней дозе

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 16-07-00736).

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, nubigena@mail.ru

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики; Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, oshestakov@cs.msu.su

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, fedushin.ilya@yandex.ru

облучения, чтобы зарегистрировать полный набор проекций. Для параллельной схемы сканирования уже давно разработаны вейвлет-алгоритмы, похожие на стандартные алгоритмы фильтрации обратных проекций, позволяющие вычислять вейвлет-коэффициенты по проекционным данным [2].

В медицинских приложениях регистрацию проекционных данных необходимо проводить как можно быстрее, чтобы уменьшить время облучения пациента и искажения, вызванные его движением. Для этого используется пучок лучей, веером расходящихся от источника излучения. Соотношения между проекционными данными и вейвлет-коэффициентами в параллельной схеме сканирования получаются из теоремы о среднем сечении. Однако в веерной схеме сканирования уже нет такой естественной связи между вейвлет-преобразованием и преобразованием Радона. Для веерной схемы можно применить алгоритм перегруппировки проекций [4] и далее использовать методы параллельной схемы. При этом из-за разных систем координат приходится дополнительно производить интерполяцию проекционных данных. Разработаны также прямые методы вычисления вейвлет-коэффициентов по веерным проекциям, применимость которых, однако, имеет свои ограничения, связанные с величиной угла обзора и близостью зоны реконструкции к центральной части изображения [5–7].

В данной работе исследуется вопрос об изменении дозы облучения (зоны покрытия), требуемой для получения проекционных данных, необходимых для локальной реконструкции участка изображения, при переходе от веерной к параллельной схеме сканирования с помощью перегруппировки проекций. Приводятся результаты численных экспериментов для различных размеров и положения восстанавливаемых участков изображения.

2 Преобразование Радона

Пусть Ω — ограниченная область на плоскости, а $f(x, y) \in L^2(\Omega)$ — функция, описывающая изображение. Преобразование Радона определяется как интеграл от функции $f(x, y)$ по прямой, которая описывается уравнением

$$x \cos \theta + y \sin \theta - s = 0,$$

где s — расстояние от начала координат до прямой, а θ — угол, образованный с осью x перпендикуляром, опущенным из начала координат на эту прямую:

$$R_\theta(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy, \quad s \in \mathbb{R}, \theta \in [0, 2\pi).$$

При фиксированном значении θ функцию $R_\theta(s)$ также называют проекцией функции $f(x, y)$ под углом θ . Функция $R_\theta(s)$ описывает так называемую

параллельную схему сканирования (рис. 1), в которой сканирующие лучи при заданном угле обзора θ проходят параллельно друг другу.

Одним из популярных методов обращения преобразования Радона является метод фильтрации обратных проекций, основанный на формуле:

$$f(x, y) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{-s_m}^{s_m} R_\theta(s) h(x \cos \theta + y \sin \theta - s) ds d\theta.$$

Здесь

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega| e^{i2\pi\omega t} d\omega,$$

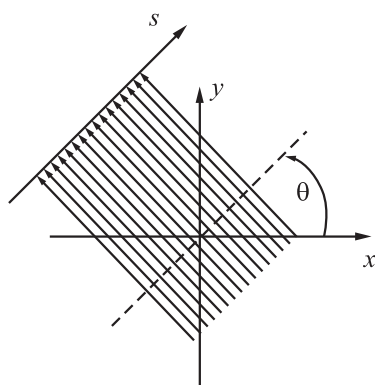


Рис. 1 Параллельная схема сканирования

а s_m — такое, что $R_\theta(s) = 0$ при всех $\theta \in [0, 2\pi)$ и $|s| > s_m$. Преобразование Радона не допускает локального обращения в том смысле, что для реконструкции изображения в какой-либо точке требуется использование всех проекций — даже по прямым, которые не проходят вблизи этой точки [1]. Однако с помощью методов вейвлет-анализа можно локально восстановить такие структуры, как границы и резкие изменения яркости изображения, в которых обычно и содержится самая важная информация.

3 Кратномасштабный анализ

В $L^2(\mathbb{R})$ кратномасштабным анализом называется специальная последовательность вложенных подпространств $\{V_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$, представляющих собой аппроксимации $L^2(\mathbb{R})$ (точное определение можно найти в [8]). Обозначим через $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ масштабирующую функцию и вейвлет-функцию, связанные с КМА $\{V_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$. Тогда $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$, а последовательности $\{\varphi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \varphi(2^j x - k)\}_{k \in \mathbf{Z}}$ и $\{\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k)\}_{k \in \mathbf{Z}}$ образуют ортонормированные базисы пространств V_j и W_j соответственно. Функции $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ можно выбрать такими, чтобы они обладали рядом полезных свойств. В частности, они могут иметь компактный носитель, заданное число нулевых моментов и непрерывных производных [8].

Функцию $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$ можно представить в виде сходящегося в среднем ряда:

$$f(x) = \sum_k a_{l,k} \varphi_{l,k}(x) + \sum_{j \geq l} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(x), \quad (1)$$

где вейвлет-коэффициенты $a_{l,k}$ и $d_{j,k}$ определяются по формулам

$$a_{l,k} = \langle \varphi_{l,k}, f \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{l,k}(x) f(x) dx;$$

$$d_{j,k} = \langle \psi_{j,k}, f \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{j,k}(x) f(x) dx.$$

Первая сумма в (1) представляет собой аппроксимацию функции $f(x)$ при разрешении l , а вторая сумма — добавляемые к этой аппроксимации детали.

В $L^2(\mathbb{R}^2)$ ортонормированный вейвлет-базис может быть составлен аналогичным образом из сжатий и сдвигов функций:

$$\Phi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y);$$

$$\Psi^{[1]}(x, y) = \varphi(x)\psi(y);$$

$$\Psi^{[2]}(x, y) = \psi(x)\varphi(y);$$

$$\Psi^{[3]}(x, y) = \psi(x)\psi(y),$$

где $\varphi(x)$ — одномерная масштабирующая функция, а $\psi(x)$ — одномерная вейвлет-функция. Пространства V_j и W_j в двумерном случае порождаются базисами $\{\Phi_{j,k}(x, y) = 2^j \Phi(2^j x - k_x, 2^j y - k_y)\}_{k_x, k_y \in \mathbf{Z}^2}$ и $\{\Psi_{j,k}^{[m]}(x, y) = 2^j \Psi^{[m]}(2^j x - k_x, 2^j y - k_y)\}_{k_x, k_y \in \mathbf{Z}^2, m=1,2,3}$. В $L^2(\mathbb{R}^2)$ справедливо разложение, аналогичное (1):

$$f(x, y) = \sum_k a_{l,k} \Phi_{l,k}(x, y) + \sum_m \sum_{j \geq l} \sum_k d_{j,k}^{[m]} \Psi_{j,k}^{[m]}(x, y), \quad (2)$$

где

$$k = (k_x, k_y);$$

$$a_{l,k} = \langle \Phi_{l,k}, f \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{l,k}(x, y) f(x, y) dx dy;$$

$$d_{j,k}^{[m]} = \langle \Psi_{j,k}^{[m]}, f \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{j,k}^{[m]}(x, y) f(x, y) dx dy.$$

4 Локальное обращение преобразования Радона

Коэффициенты $a_{l,k}$ и $d_{l,k}^{[m]}$ в (2) можно выразить через $R_\theta(s)$, получив таким образом метод реконструкции функции $f(x, y)$, основанный на вейвлет-разложении. Для каждого $\theta \in [0, 2\pi)$ определим функции $\varrho_\theta(s)$ и $\rho_\theta^{[m]}(s)$, $m = 1, 2, 3$, через их преобразования Фурье:

$$\begin{aligned}\widehat{\varrho}_\theta(\omega) &= \frac{1}{2} \widehat{\varphi}(\omega \cos \theta) \widehat{\varphi}(\omega \sin \theta); \\ \widehat{\rho^{[1]}_\theta}(\omega) &= \frac{1}{2} \widehat{\varphi}(\omega \cos \theta) \widehat{\psi}(\omega \sin \theta); \\ \widehat{\rho^{[2]}_\theta}(\omega) &= \frac{1}{2} \widehat{\psi}(\omega \cos \theta) \widehat{\varphi}(\omega \sin \theta); \\ \widehat{\rho^{[3]}_\theta}(\omega) &= \frac{1}{2} \widehat{\psi}(\omega \cos \theta) \widehat{\psi}(\omega \sin \theta).\end{aligned}$$

Тогда [1]

$$\begin{aligned}a_{l,k} &= 2^l \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_\theta(s) \varrho_\theta(2^l s - k_x \cos \theta - k_y \sin \theta) ds d\theta; \\ d_{j,k}^{[m]} &= 2^j \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_\theta(s) \rho_\theta^{[m]}(2^j s - k_x \cos \theta - k_y \sin \theta) ds d\theta.\end{aligned}$$

Если вейвлет-функция $\psi(x)$ имеет компактный носитель и достаточно много нулевых моментов, то функции $\rho_\theta^{[m]}(s)$ будут заметно отличны от нуля только в окрестности с радиусом, равным радиусу носителя двумерной вейвлет-функции $\Psi^{[m]}(x, y)$. Следовательно, коэффициенты $d_{j,k}^{[m]}$ можно вычислить достаточно точно, используя значения $R_\theta(s)$ только из интервала радиуса $2^{-j}T$ с центром в точке $2^{-j}(k_x \cos \theta - k_y \sin \theta)$, где T — радиус носителя $\Psi^{[m]}(x, y)$. Эти значения $R_\theta(s)$ представляют собой проекции функции $f(x, y)$ по прямым, проходящим в круге радиуса $2^{-j}T$ с центром в точке $(2^{-j}k_x, 2^{-j}k_y)$. Радиус круга становится меньше с ростом j , т. е. для восстановления более мелких деталей изображения требуется более локальная информация, чем для восстановления крупных деталей. Зачастую в томографическом эксперименте представляют интерес именно мелкие детали. Это обстоятельство позволяет значительно снизить дозу облучения в процессе получения проекционных данных [1].

5 Веерная схема сканирования

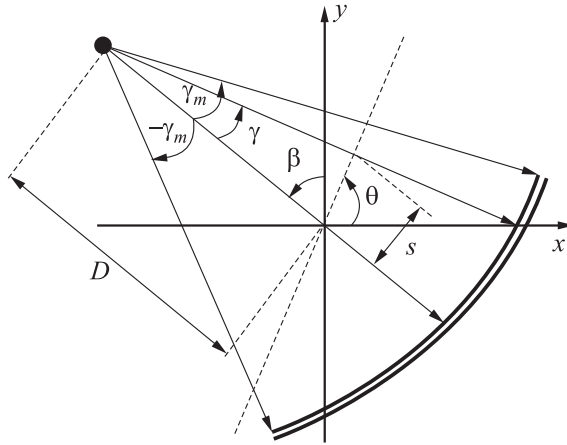


Рис. 2 Веерная схема сканирования

а γ_m — угол максимального отклонения луча внутри пучка. В такой схеме сканирования проекционные данные описываются следующим выражением [4]:

$$R_\beta(\gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos(\beta + \gamma) + y \sin(\beta + \gamma) - D \sin \gamma) dx dy .$$

Применение алгоритма фильтрации обратных проекций позволяет восстановить изображение $f(x, y)$ по проекционным данным $R_\beta(\gamma)$ по формуле [4]:

$$f(x, y) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{-\gamma_m}^{\gamma_m} R_\beta(\gamma) h(x \cos(\beta + \gamma) + y \sin(\beta + \gamma) - D \sin \gamma) D \cos \gamma d\gamma d\beta .$$

Для локальной реконструкции участков изображения в веерной схеме сканирования обычно используется алгоритм перегруппировки проекций, основанный на связи между переменными (θ, s) и (β, γ) :

$$\theta = \beta + \gamma; \quad s = D \sin \gamma . \quad (3)$$

После получения необходимого множества проекций в веерной схеме сканирования с помощью соотношения (3) эти проекции переводятся в параллельную схему и далее посредством изложенного метода вейвлет-разложения осуществляется локальная реконструкция мелких структур изображения.

6 Численные эксперименты для модельных примеров

Предположим, что область Ω является кругом с центром в начале координат и радиусом R , а область Ω_1 , интересующая исследователя, также является кругом внутри Ω с центром в точке (x_0, y_0) и радиусом r . Без ограничения общности ввиду симметрии будем считать, что центр Ω_1 лежит на оси абсцисс ($y_0 = 0$).

Исследуем вопрос об изменении дозы облучения, требуемой для получения проекционных данных, необходимых для локальной реконструкции участка изображения, при переходе от параллельной к веерной схеме сканирования с помощью перегруппировки проекций. Обозначим через S_1 и S_2 отношения зоны покрытия Ω_1 к зоне покрытия Ω в параллельной и веерной схемах соответственно.

В параллельной схеме сканирования прямые, обеспечивающие покрытие, задаются неравенством:

$$-r \leq s - x_0 \cos \theta - y_0 \sin \theta \leq r,$$

откуда получаем

$$x_0 \cos \theta - r \leq s \leq x_0 \cos \theta + r$$

и

$$S_1 = \int_0^{2\pi} \int_{x_0 \cos \theta - r}^{x_0 \cos \theta + r} ds d\theta \Big/ \int_0^{2\pi} \int_{-R}^R ds d\theta = \frac{r}{R}.$$

Перейдем к координатам веерной схемы, используя (3):

$$x_0 \cos(\beta + \gamma) - r \leq D \sin \gamma \leq x_0 \cos(\beta + \gamma) + r.$$

Решение последнего неравенства относительно $\gamma \in [-\pi, \pi)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \gamma_1(\beta) \equiv -\arcsin \frac{r}{b(\beta)} + \arcsin \frac{x_0 \cos \beta}{b(\beta)} \leq \gamma \leq \arcsin \frac{r}{b(\beta)} + \\ + \arcsin \frac{x_0 \cos \beta}{b(\beta)} \equiv \gamma_2(\beta), \end{aligned}$$

где

$$b(\beta) = \sqrt{x_0^2 \cos^2 \beta + (x_0 \sin \beta + D)^2} = \sqrt{x_0^2 + 2x_0 D \sin \beta + D^2}.$$

Таким образом,

$$S_2 = \int_0^{2\pi} \int_{\gamma_1(\beta)}^{\gamma_2(\beta)} d\gamma d\beta \Big/ \int_0^{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\gamma d\beta = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{\gamma_1(\beta)}^{\gamma_2(\beta)} d\gamma d\beta.$$

Таблица 1 Значения S_1/S_2

D/R	$x_0/(R-r)$	r/R				
		0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1,5	0,0	1,09378	1,08721	1,07364	1,05209	1,02060
	0,5	1,06828	1,07126	1,06480	1,04841	1,02008
	1,0	0,98033	1,01885	1,03668	1,03703	1,01852
3,0	0,0	1,01932	1,01781	1,01475	1,01011	1,00381
	0,5	1,01354	1,01428	1,01292	1,00943	1,00373
	1,0	0,99567	1,00351	1,00736	1,00738	1,00349
6,0	0,0	1,00464	1,00427	1,00352	1,00240	1,00090
	0,5	1,00323	1,00341	1,00308	1,00224	1,00088
	1,0	0,99895	1,00083	1,00176	1,00176	1,00082

Таблица 2 Значения S_1/S_2 при $x_0/(R-r) = 1$

D/R	r/R					
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
1,5	0,96638	0,98033	0,99231	1,00261	1,01141	1,01885
3,0	0,99305	0,99567	0,99802	1,00011	1,00193	1,00351
6,0	0,99833	0,99895	0,99951	1,00001	1,00045	1,00083
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
1,5	1,02503	1,03003	1,03390	1,03668	1,03838	1,39020
3,0	1,00484	1,00592	1,00676	1,00736	1,00773	1,00785
6,0	1,00115	1,00141	1,00161	1,00176	1,00185	1,00188
	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
1,5	1,03858	1,03703	1,03434	1,03042	1,02519	1,01852
3,0	1,00774	1,00738	1,00678	1,00594	1,00484	1,00349
6,0	1,00185	1,00176	1,00162	1,00141	1,00115	1,00082

Рассмотрим модельные примеры для некоторых показательных значений соотношений параметров. В табл. 1 и 2 приведены значения S_1/S_2 при следующих соотношениях базовых параметров. Величина r/R показывает, насколько велик исследуемый объект Ω_1 по отношению к облучаемому объекту Ω . Величина $x_0/(R-r)$ задает относительное положение Ω_1 внутри Ω . Величина D/R указывает на удаленность источника излучения от облучаемого объекта.

Заметим, что S_1/S_2 стремится к единице при увеличении относительного размера исследуемой области, при этом сходимость тем быстрее, чем дальше от облучаемого объекта находится источник излучения. Также скорость сходимости увеличивается при удалении центра Ω_1 от начала координат. Как видно, сходимость не является монотонной: при относительно малых размерах исследуемой области отношение S_1/S_2 меньше единицы и монотонно возрастает с увеличением r/R до некоторого уровня, а затем монотонно убывает к единице. Граница

между промежутками возрастания и убывания смещается вправо по r/R при удалении центра Ω_1 от начала координат, независимо от удаленности источника излучения.

Литература

1. *Berenstein C. A., Walnut D.* Wavelets and local tomography // Wavelets in medicine and biology / Eds. A. Aldroubi, M. Unser. — Boca Raton, FL, USA: CRC, 1996. P. 231–261.
2. *Rashid-Farokhi F., Liu K. J. R., Berenstein C. A., Walnut D.* Wavelet-based multiresolution local tomography // IEEE T. Image Process., 1997. Vol. 6. No. 10. P. 1412–1430.
3. *Zhao S., Wang G., Hsieh J.* Wavelet filtering algorithm for fan-beam CT // IEEE Electronics Lett., 1998. Vol. 34. No. 25. P. 2395–2396.
4. *Kak A. C., Slaney M.* Principles of computerized tomographic imaging. — New York, NY, USA: IEEE Press, 1988. 329 p.
5. *Rashid-Farrokhi F., Liu K. J. R., Berenstein C. A.* Local tomography in fan-beam geometry using wavelets // 3rd IEEE Conference (International) on Image Processing Proceedings. — IEEE Computer Society, 1996. Vol. 2. P. 709–712.
6. *Bonnet S., Peyrin F., Turjman F., Prost R.* Multiresolution reconstruction in fan-beam tomography // IEEE T. Image Process., 2002. Vol. 11. No. 3. P. 169–176.
7. *Ушаков В. Г., Шестаков О. В.* Использование вейвлет-разложения в задачах компьютерной томографии с верной схемой сканирования // Системы и средства информатики, 2006. Спец. вып.: Математические модели в информационных технологиях. С. 77–84.
8. *Mallat S.* A wavelet tour of signal processing. — New York, NY, USA: Academic Press, 1999. 857 p.

Поступила в редакцию 12.06.17

LOCAL RECONSTRUCTION OF TOMOGRAPHIC IMAGES IN PARALLEL AND FAN-BEAM SCANNING SCHEMES

A. A. Kudryavtsev¹, O. V. Shestakov^{1,2}, and I. A. Fedushin¹

¹Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

²Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: Tomographic methods for reconstructing images of objects are widely used in a variety of fields, including medicine, biology, plasma physics, gas dynamics, geophysics, astronomy, and radar. In some applications, it is impossible

(or undesirable) to obtain a complete set of projection data to restore the image of the entire object. Sometimes, only a portion of the image (often small compared to the image of the whole object) is of interest, and the problem of local reconstruction with an incomplete set of projections arises. One of the most popular methods for solving this problem is the wavelet decomposition, which allows local restoration of small image structures. The wavelet decomposition method is applicable for the parallel tomographic scan scheme. In the fan-beam scheme, the projection rearrangement method is usually used, which makes it possible to apply the reconstruction algorithms developed for the parallel scheme. The paper considers the question of changing the required amount of projection data during the transition from the fan-beam to parallel scheme.

Keywords: Radon transform; wavelets; local reconstruction; fan-beam scheme; parallel scheme

DOI: 10.14357/08696527170305

Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-07-00736).

References

1. Berenstein, C. A., and D. Walnut. 1996. Wavelets and local tomography. *Wavelets in medicine and biology*. Eds. A. Aldroubi and M. Unser. Boca Raton, FL: CRC. 231–261.
2. Rashid-Farokhi, F., K. J. R. Liu, C. A. Berenstein, and D. Walnut. 1997. Wavelet-based multiresolution local tomography. *IEEE T. Image Process.* 6(10):1412–1430.
3. Zhao, S., G. Wang, and J. Hsieh. 1998. Wavelet filtering algorithm for fan-beam CT. *IEEE Electronics Lett.* 34(25):2395–2396.
4. Kak, A. C., and M. Slaney. 1988. *Principles of computerized tomographic imaging*. New York, NY: IEEE Press. 329 p.
5. Rashid-Farrokhi, F., K. J. R. Liu, and C. A. Berenstein. 1996. Local tomography in fan-beam geometry using wavelets. *3rd IEEE Conference (International) on Image Processing Proceedings*. IEEE Computer Society. 2:709–712.
6. Bonnet, S., F. Peyrin, F. Turjman, and R. Prost. 2002. Multiresolution reconstruction in fan-beam tomography. *IEEE T. Image Process.* 11(3):169–176.
7. Ushakov, V. G., and O. V. Shestakov. 2006. Ispol'zovanie veyvlet-razlozheniya v zadachakh komp'yuternoy tomografii s veerney skhemoy skanirovaniya [The application of wavelet expansions for solving the problems of computer tomography with a fan-beam scanning schemes]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics*. Spetsial'nyy vypusk [Special Issue]. 77-84.
8. Mallat, S. A. 1999. *Wavelet tour of signal processing*. New York, NY: Academic Press. 857 p.

Received June 12, 2017

Contributors

Kudryavtsev Alexey A. (b. 1978) — Candidate of Science in physics and mathematics, associate professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; nubigena@mail.ru

Shestakov Oleg V. (b. 1976) — Doctor of Science in physics and mathematics, assistant professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; oshestakov@cs.msu.su

Fedushin Ilya A. (b. 1997) — student, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; fedushin.ilya@yandex.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПОЗДНИХ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИСКРИМИНАНТНОГО И КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ГЛИКЕМИИ В РАННЕМ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОМ ПЕРИОДЕ*

Т. В. Захарова¹, А. В. Сливкина²

Аннотация: Рассматривается применение статистического метода классификации многомерных наблюдений — метода дискриминантного анализа и статистического метода, позволяющего оценить тесноту совместного влияния факторов на результат — корреляционного анализа данных. Решается задача прогнозирования развития осложнений у пациентов после операции на поджелудочной железе исходя из набора предсказывающих переменных (предикторов), которыми являются такие характеристики уровня глюкозы в крови у пациентов, как дисперсия, размах выборки, среднее значение, максимум и минимум. В связи с этим вынесена гипотеза исследования: средний уровень гликемии в раннем послеоперационном периоде имеет решающее значение для прогнозирования нарушений углеводного обмена в отдаленном послеоперационном периоде. С использованием пакета прикладных программ STATISTICA был проведен дискриминантный анализ экспериментальных данных. По результатам исследования гипотеза отклонена.

Ключевые слова: лямбда Уилкса; выборочная совокупность; дисперсия выборки; размах; дискриминантный анализ

DOI: 10.14357/08696527170306

1 Введение

Методы дискриминантного анализа применяются при решении задач разделения неоднородной выборки на однородные группы. Задачи такого типа возникают в самых различных областях: контроле качества продукции, геологии, биологии, экономике, социологии, психологии и т. д. В данной работе метод дискриминантного анализа был применен в сфере медицины, а именно:

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-07-00736).

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики; Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, lsa@cs.msu.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, anya-slivkina@mail.ru

в изучении риска возникновения осложнений у больных, перенесших операции на поджелудочной железе.

Дискриминантный анализ часто используют как метод прогнозирования поведения наблюдаемых объектов на основе имеющейся информации о характеристиках обучающих выборок, которые определяют однородную группу. Например, в работах [1–3] классифицируются состояния пациентов с целью прогнозирования эффективности лечения, в работе [4] прогнозируется развитие сахарного диабета (СД).

В настоящей работе исследуется вопрос о существовании зависимости между показателем уровня глюкозы в крови у больных сразу после операции и возможностью возникновения таких осложнений, как СД и нарушение теста толерантности к глюкозе. Полученная информация должна быть использована при назначении определенного лечения в период реабилитации, в том числе введение инсулина и постоянный контроль уровня глюкозы в крови. Иначе говоря, применение метода имеет цель: построение модели, предсказывающей, к какой из четырех групп (определяемых ниже в разд. 3) относятся пациенты, исходя из набора предсказывающих переменных (предикторов), которыми являются такие характеристики уровня глюкозы в крови у пациентов, как дисперсия, размах выборки, среднее значение, максимум и минимум. Эти параметры регистрировались у пациентов ежедневно в течение 5 сут после операции. Необходимо было определить переменные, которые имеют существенное значение для разделения наблюдений на группы, и разработать алгоритм классификации новых пациентов по характеристикам уровня глюкозы с целью определения их принадлежности к той или иной группе.

Исследование было проведено на базе Института хирургии имени А. В. Вишневского.

2 Постановка задачи

Пусть имеется множество, состоящее из n векторов наблюдений X . Каждый из векторов характеризуется k признаками, т. е. $X = (X_1, \dots, X_k)$, где X_1, \dots, X_k — значения признака для i -го пациента. Допустим, что все множество объектов разбито на q подмножеств (или классов) ($q > 1$). Из каждого подмножества взята выборка объемом n_g , где g — номер подмножества, $g = 1, \dots, q$.

Дискриминантные признаки — это признаки, которые будут отличать одно подмножество от другого. Необходимо, чтобы:

- (1) число объектов наблюдений превышало число дискриминантных переменных, т. е. $k < n$;
- (2) дискриминантные переменные были линейно независимы, т. е. $X_1 a_1 + X_2 a_2 + \dots + X_k a_k = 0 \Leftrightarrow a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_k^2 = 0$;
- (3) X_i имели нормальное распределение $N(\mu, \sigma^2)$.

Канонической дискриминантной функцией называется функция вида:

$$d_{gm} = \beta_0 + \beta_1 x_{1gm} + \dots + \beta_k x_{kgm},$$

где d_{gm} — значение g -й канонической дискриминантной функции для m -го объекта, $m = 1, \dots, n$, $g = 1, \dots, q$; x_{kgm} — значение дискриминантной переменной X_k для m -го объекта в группе g ; β_0, \dots, β_k — коэффициенты дискриминантной функции.

Необходимо подставить значения компонент вектора X в дискриминантные функции для каждого g -го подмножества и рассчитать значения q дискриминантных функций. Вектор X относится к тому подмножеству g , для которого величина d_{gm} имеет максимальное значение.

Так как дискриминантные функции находятся по выборочным данным, они нуждаются в проверке статистической значимости. В данной работе будет применена статистика Уилкса, называемая еще лямбда Уилкса. Лямбда Уилкса — это отношение меры внутригрупповой изменчивости к мере общей изменчивости:

$$L = \frac{\det(E)}{\det(T)}.$$

Здесь E — матрица внутриклассового разброса:

$$E = \sum_{j=1}^q E_j,$$

где E_j — матрица рассеяния j -го класса:

$$E_j = \sum_{x_i \in S_j} (x_i - \bar{X}_i) (x_i - \bar{X}_i)^T;$$

T — общая матрица рассеяния:

$$T = \sum_{k=1}^n (x_i - \bar{X}_i) (x_i - \bar{X}_i)^T.$$

Из определения следует, что значение лямбды Уилкса меняется от 1 до 0. И чем меньшее значение имеет лямбда Уилкса, тем лучшим оказывается разделение на группы при дискриминантном анализе [5].

3 Исходные данные и условия эксперимента

Проводилась оценка состояния углеводного обмена до операции и после в отдаленном периоде по критериям Всемирной организации здравоохранения 1999 г.: норма; нарушенная гликемия натощак; нарушение толерантности к глюкозе (НТГ); СД. Для этого были сделаны замеры уровня глюкозы в крови в течение 5 сут после операции на поджелудочной железе.

По данным комплексной оценки состояния углеводного обмена в раннем и отдаленном послеоперационном периоде пациенты были разбиты на следующие группы: 1-я группа (норма/норма) состоит из пациентов, у которых как до, так и после операции показатели глюкозы крови оставались в пределах нормы; 2-я группа (норма/НТГ) состоит из пациентов, у которых до операции показатели глюкозы крови были в пределах нормы, а после операции диагностирована НТГ; 3-ю группу (норма/СД) составляют пациенты, у которых до операции показатели глюкозы крови были в пределах нормы, а после операции диагностирован СД; в 4-ю группу (СД/СД) входят пациенты, которые как до, так и после операции имели СД.

Из всех показателей углеводного обмена в раннем послеоперационном периоде были выбраны дискриминантные переменные: среднее, дисперсия, максимум, минимум и размах значений уровня глюкозы в крови в раннем послеоперационном периоде.

Все данные состояли из 183 наблюдений, каждое из которых содержало 5 признаков.

Гипотеза исследования была сформулирована так: средний уровень гликемии в раннем послеоперационном периоде имеет решающее значение для прогнозирования нарушений углеводного обмена в отдаленном послеоперационном периоде.

4 Результаты эксперимента

В программе STATISTICA имеется модуль Discriminant Analysis (дискриминантный анализ), представляющий собой обучающую систему для поиска переменных, по которым производится классификация наблюдений по заданным группам. Модели, реализованные в модуле, являются линейными, а функции классификации и дискриминантные функции — линейными комбинациями наблюдаемых величин [6].

4.1 Основной результат

В модуле «Дискриминантный анализ» были определены параметры модели и рассчитаны общие характеристики: DISCRIMINANT FUNCTION ANALYSIS SUMMARY — STEP 3; N OF VARS IN MODEL: 3; GROUPING: 4 GRPS; WILKS' LAMBDA: 0,80437; APPROX. $F(9,430) = 4,4802$; $P < 0,0000$.

Основные результаты представлены в табл. 1.

Из пяти рассматриваемых изначально признаков в модель не вошли признаки «min» и «max» как малоинформативные.

Статистика Partial Lambda показывает отношение лямбды Уилкса после добавления данного признака к лямбде Уилкса до добавления данного признака, поэтому чем меньшим оказывается значение Partial Lambda, тем ценнее данный признак [7].

Таблица 1 Результаты дискриминантного анализа ($N = 183$ наблюдения)

Признак	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (3,177)	<i>p</i> -level
Среднее	0,947951	0,848535	10,53160	0,000002
Дисперсия	0,831367	0,967527	1,98018	0,118652
Размах выборки	0,824294	0,975830	1,46137	0,226742

Таблица 2 Результаты дискриминантного анализа при классификации на две группы ($N = 183$ наблюдения)

Признак	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (3,177)	<i>p</i> -level
Среднее	0,978236	0,861513	28,93466	0,000002
Дисперсия	0,851727	0,989475	1,91463	0,168164

Таблица 3 Матрица классификации

Группа	Percent correct	Норма/норма	Норма/болен
Норма/норма	47,94521	35	38
Норма/болен	80,00000	22	88
Всего	67,21311	57	126

Значение Partial Lambda (частная лямбда Уилкса) в табл. 1 демонстрирует, что наибольший одиночный вклад в дискриминацию по группам вносит переменная «Среднее». Но рассчитанная статистика Уилкса модели близка к единице, $WILKS' LAMBDA = 0,80437$. Это означает, что наблюдаемые средние значения групп близки между собой.

Следовательно, можно сделать вывод, что самым информативным из имеющихся признаков является признак «Среднее», но одного такого признака недостаточно для разделения пациентов на вышеперечисленные группы и построение прогнозов. Получено опровержение вынесенной выше гипотезы.

С целью увеличения точности классификации была предпринята попытка сократить число групп до двух: норма/норма и норма/болен (табл. 2).

Однако матрица классификации демонстрирует низкую точность классификации даже в этом случае (табл. 3).

4.2 Анализ канонических дискриминантных функций

Далее был проведен анализ канонических корреляций, которые определяли последовательные канонические корни и функции.

По данным табл. 4, только первая каноническая дискриминантная функция (ось Root1) является статистически значимой ($p = 0,000012$) [8].

Таблица 4 Оценка канонических дискриминантных функций

Eigen-value	Canonical R	Wilks' Lambda	Chi-Sqr.	df	p-level
0,208150	0,415076	0,804370	38,85869	9	0,000012
0,024012	0,153132	0,971800	5,10608	4	0,276585
0,004889	0,069750	0,995135	0,87053	1	0,350810

Таблица 5 Канонические дискриминантные функции

Признак	Root 1	Root 2	Root 3
Среднее значение	-1,15121	-0,08003	0,42738
Дисперсия	0,83209	-3,27522	0,01945
Размах выборки	-0,48232	3,07749	-1,19630
Eigen value	0,20815	0,02401	0,00489
Cum. Prop	0,87808	0,97938	1,00000

По результатам в табл. 5 можно сказать, что первая функция наиболее «нагружена» такими значениями, как «Среднее значение» и «Дисперсия», вторая функция — значениями «Дисперсия» и «Размах выборки», а третья — значениями «Размах выборки» и «Среднее значение».

Значение Cum. Prop (накопленный процент) указывает на то, что первая дискриминантная функция учитывает 88% всей дискриминирующей мощности, вторая — 10%, а третья — 2%.

На рис. 1–3 даны графические представления разделения объектов в пространстве пары канонических линейных дискриминантных функций.

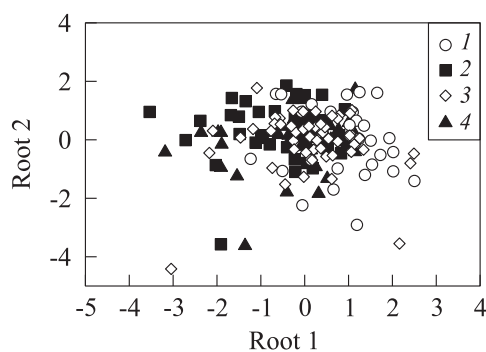


Рис. 1 Диаграмма рассеивания для первой и второй функции: 1 — норма/норма; 2 — норма/СД; 3 — норма/НТГ; 4 — СД/СД

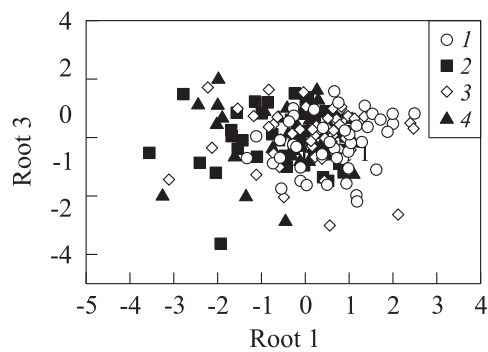


Рис. 2 Диаграмма рассеивания для первой и третьей функции: 1 — норма/норма; 2 — норма/СД; 3 — норма/НТГ; 4 — СД/СД

На рисунках видно, что «облака точек» каждой из групп сильно перекрываются. Это означает, что пациенты слабо дискриминируются на группы норма/норма, норма/СД, норма/НТГ и СД/СД по таким признакам, как средний уровень глюкозы в крови после операции, максимальный и минимальный уровень, а также размах и дисперсия между этими значениями.

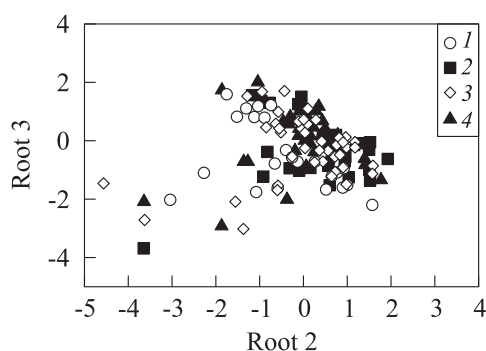


Рис. 3 Диаграмма рассеивания для второй и третьей функции: 1 — норма/норма; 2 — норма/СД; 3 — норма/НТГ; 4 — СД/СД

4.3 Коэффициент частной и множественной корреляции

Показатель множественной корреляции характеризует тесноту связи рассматриваемого набора факторов с исследуемым признаком, или, иначе, оценивает тесноту совместного влияния факторов на результат.

Введем функцию-индикатор, которая принимает следующие значения в зависимости от группы пациентов: для группы норма/норма — 1; для групп норма/НТГ и норма/СД — -1; для группы СД/СД — 0. В дальнейшем значения этой функции будем называть состояниями.

Тогда для переменных «Состояние», «Дисперсия», «Среднее значение» и «Размах», подсчитанных по всей выборке пациентов, построим матрицу парных коэффициентов корреляции (табл. 6).

В общем виде формула для подсчета коэффициента корреляции такова:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum (y_i - \bar{y}_i)^2}},$$

где x_i — значения, принимаемые переменной X ; y_i — значения, принимаемые переменной Y ; \bar{x}_i — среднее по X ; \bar{y}_i — среднее по Y .

Таблица 6 Матрица парных коэффициентов корреляции

Признак	Состояние	Дисперсия	Среднее значение	Размах
Состояние	1	-0,159067658	-0,36800167	-0,184964345
Дисперсия	-0,159067658	1	0,6079	0,9533
Среднее значение	-0,368	0,6079	1	0,6050
Размах	-0,1849	0,9533	0,6050	1

Вычислим определитель матрицы корреляции

$$A = \begin{vmatrix} 1 & -0,159 & -0,368 & -0,184 \\ -0,159 & 1 & 0,608 & 0,953 \\ -0,368 & 0,608 & 1 & 0,605 \\ -0,185 & 0,953 & 0,605 & 1 \end{vmatrix}$$

по формуле:

$$\det(A) = \sum_{j=1}^n (-1)^{1+j} a_{1j} M_j^{-1},$$

где M_j^{-1} — дополнительный минор к элементу a_{1j} .

Итак, $\det(A) = -1,07517 \cdot 10^{-17}$. Минор $M_{11} = -1,26135 \cdot 10^{-17}$.

Тогда коэффициент множественной корреляции можно рассчитать по формуле:

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{\det(A)}{M_{11}}} = 0,384195532.$$

Границы изменения коэффициента множественной корреляции — от 0 до 1. Чем ближе его значение к 1, тем теснее связь изучаемого признака со всем набором факторов.

Проверка статистической значимости ρ осуществляется на основе критерия Фишера:

$$F_{\text{observation}} = \frac{n - k - 1}{k} \frac{\rho^2}{1 - \rho^2} = 7,749,$$

где ρ^2 — квадрат множественного коэффициента корреляции; n — число наблюдений; k — число факторов, влияние которых изучается.

По таблице значений F критерия Фишера для уровня значимости $\alpha = 0,01$ и числа степеней свободы $m_1 = 4$ и $m_2 = 179$ находим $F_{\text{critical}} = 2,76$. Таким образом, $F_{\text{observation}} > F_{\text{critical}}$; следовательно, полученный коэффициент множественной корреляции является статистически значимым.

Оценим степень связи признака «Состояние» с фактором «Среднее значение» при исключении влияния всех прочих факторов. Для этого рассчитаем частные коэффициенты корреляции.

Расчет частных коэффициентов корреляции может осуществляться на основе алгебраических дополнений:

$$r = \frac{-D_{12}}{\sqrt{D_{11}D_{22}}},$$

где D_{11} , D_{12} и D_{22} — алгебраические дополнения соответственно к элементам r_{11} , r_{12} и r_{22} корреляционной матрицы. Пределы изменения частных коэффициентов

корреляции $-1 < r_{\text{partial}} < 1$ и их интерпретаций такая же, как и у парных коэффициентов корреляции.

Тогда r (влияние среднего значения на состояние без учета влияния дисперсии и размаха) равно 0,000000028.

Проверка статистической значимости частных коэффициентов корреляции осуществляется на основе t -критерия:

$$t_{\text{observation}} = \frac{r_{\text{partial}} \sqrt{n - 2 - l}}{\sqrt{1 - r_{\text{partial}}^2}},$$

где $(n - 2 - l)$ — число степеней свободы; l — число факторов, влияние которых исключается; n — объем выборки.

Таким образом, $t_{\text{observation}} = 0,000000037$, $t_{\text{critical}}(0,05, 178) = 1,972$. Следовательно, $t_{\text{observation}} < t_{\text{critical}}$, а это означает, что полученный показатель не является значимым на 5%-ном уровне.

В итоге получено опровержение гипотезы о влиянии среднего значения на возникновение возможных послеоперационных осложнений.

5 Заключение

В данной работе была подробно проанализирована возможная взаимосвязь между уровнем гликемии и послеоперационными осложнениями. В качестве инструмента исследования был использован пакет программ STATISTICA.

В результате исследования было дано опровержение следующей гипотезы: средний уровень гликемии в раннем послеоперационном периоде имеет решающее значение для прогнозирования нарушений углеводного обмена в отдаленном послеоперационном периоде. Это не означает, что подобные прогнозы невозможны. В перспективе необходимо определить не один, а набор дискриминирующих признаков, в который может войти и средний уровень гликемии.

Выражаем искреннюю благодарность за экспериментальные материалы, предоставленные Институтом хирургии имени А. В. Вишневского.

Литература

1. Захарова Т. В., Золоева М. В. Прогнозирование состояния пациентов // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2007. Т. 14. № 2. С. 298–299.
2. Драницына М. А., Захарова Т. В. Классификация состояний пациентов с целью прогнозирования лечения // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2009. Т. 16. № 5. С. 840–841.
3. Драницына М. А., Захарова Т. В. Дискриминантный анализ для классификации и прогнозирования результатов лечения // Системы и средства информатики, 2013. Т. 23. № 2. С. 89–95.

4. *Захарова Т. В., Абрамова Е. М.* О методе прогнозирования и классификации для цензурированных данных // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 4. С. 105–111.
5. *Халафян А. А.* Современные статистические методы медицинских исследований. — М.: Эдиториал УРСС, 2008. 320 с.
6. *Бурева Н. Н.* Многомерный статистический анализ с использованием ППП «STATISTICA». — Нижний Новгород, 2007. 112 с.
7. *Дубров А. М.* Многомерные статистические методы и основы эконометрики. — М.: МЭСИ, 2008. 79 с.
8. *Боровиков В. П.* Популярное введение в программу STATISTICA. — М.: КомпьютерПресс, 1998. 267 с.

Поступила в редакцию 23.04.17

**PREDICTION OF LATE POSTOPERATIVE COMPLICATIONS
BASED ON THE RESULTS OF DISCRIMINANT
AND CORRELATION ANALYSES OF THE EARLY POSTOPERATIVE
GLYCEMIA CHARACTERISTICS**

T. V. Zakharova^{1,2} and A. V. Slivkina¹

¹Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

²Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The application of the statistical methods for multidimensional observations classification, including discriminant analysis and data correlation analysis which make it possible to evaluate the strength of the factors’ joint influence on the result, is considered. The main task is to predict complications development among patients, who underwent pancreas surgery. The research hypothesis suggests that the average early postoperative blood glucose level is of a crucial value for predicting carbohydrate metabolism disorders in the late postoperative period. The considered solution is based on a set of predictors (variables) associated with the blood glucose level, i. e., variance, sample size, mean, maximum, and minimum. The results of the discriminant analysis, performed using the STATISTICA software package on the basis of the available experimental data, do not confirm the research hypothesis.

Keywords: Lambda Wilks; data sample; sample variance; range; discriminant analysis

DOI: 10.14357/08696527170306

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-07-00736).

References

1. Zakharova, T. V., and M. V. Zoloeva. 2007. Prognozirovaniye sostoyaniya patsientov [Predicting the state of patients]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Survey of Applied and Industrial Mathematics] 14(2):298–299.
2. Dranitsyna, M. A., and T. V. Zakharova. 2009. Klassifikatsiya sostoyaniy patsientov s tsel'yu prognozirovaniya lecheniya [Classification of patient states for the purpose of predicting treatment]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Survey of Applied and Industrial Mathematics] 16(5):840–841.
3. Dranitsyna, M. A., and T. V. Zakharova. 2013. Diskriminantnyy analiz dlya klassifikatsii i prognozirovaniya rezul'tatov lecheniya [Discriminant analysis for the classification and prediction of treatment outcomes] *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 23(2):89–95.
4. Zakharova, T. V., and E. M. Abramova. 2013. O metode prognozirovaniya i klassifikatsii dlya tsenzurovannykh dannykh [About the method of forecasting and classification for censored data]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(4):105–111.
5. Khalafyan, A. A. 2008. *Sovremennye statisticheskie metody meditsinskikh issledovaniy* [Modern statistical methods of medical research]. Moscow: Editorial URSS. 320 p.
6. Bureeva, N. N. 2007. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz s ispol'zovaniem PPP "STATISTICA"* [Multivariate statistical analysis using the "STATISTICA"]. Nizhny Novgorod: NNGU. 112 p.
7. Dubrov, A. M. 2008. *Mnogomernyye statisticheskie metody i osnovy ekonometriki* [Multidimensional statistical methods and the foundations of econometrics]. Moscow: MESI. 79 p.
8. Borovikov, V. P. 1998. *Populyarnoe vvedenie v programmu STATISTICA* [A popular introduction to the program STATISTICA]. Moscow: Computer-Press. 267 p.

Received April 23, 2017

Contributors

Zakharova Tatiana V. (b. 1962) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, assistant professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; lsa@cs.msu.ru

Slivkina Anna V. (b. 1995) — student, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; anya-slivkina@mail.ru

ПОРОЖДЕНИЕ ЭКСПЕРТНО-ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ*

А. М. Бочкарев¹, И. Л. Софронов², В. В. Стрижов³

Аннотация: Предложен алгоритм построения комбинированной предсказательной модели для поровой проницаемости горной породы. Исходными являются керновые данные пористости, плотности и других свойств породы. Модель использует символьную регрессию для порождения суперпозиций исходных экспертно-заданных функций и затем нейронную сеть с этими суперпозициями-признаками. Вычислительный эксперимент для оценки эффективности модели поставлен не только на данных измерений керна, но и на других типах данных из открытых баз аэро- и гидродинамических измерений. Также выполнено сравнение с традиционными моделями, такими как нейронная сеть, Lasso-регрессия, Support Vector Regression (SVR) и градиентный бустинг.

Ключевые слова: прогноз; поровая проницаемость; порождение суперпозиций; символьная регрессия; нейронная сеть; SVR; Lasso; градиентный бустинг

DOI: 10.14357/08696527170307

1 Введение

Одним из ключевых физических свойств породы является поровая проницаемость [1], характеризующая ее фильтрационные свойства. Для непосредственного измерения проницаемости используются извлеченные из скважины образцы горной породы — керн.

В работе рассматривается задача разработки модели для прогноза поровой проницаемости горной породы на основе измерений других физических свойств. Имеется достаточно много публикаций по различным подходам и результатам построения таких моделей. В [2, 3] моделью для предсказания проницаемости служит линейная регрессия. В [4, 5] показано улучшение качества восстановления проницаемости при предобработке данных и отборе признаков. В [6] для восстановления проницаемости предложено использовать байесовское усреднение

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-07-0155) и РНФ (проект 15-11-00015).

¹ Московский физико-технический институт, artem.bochkarev@phystech.edu

² Московский физико-технический институт, ISofronov@slb.com

³ Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, strijov@ccas.ru

моделей; проведено сравнение этого метода с Lasso-регрессией [7]. Также для решения задачи прогнозирования проницаемости используются непараметрическая регрессия [8] и алгоритм SVR [9]. Применение различных, в том числе рекуррентных, нейронных сетей в качестве моделей для вычисления проницаемости рассмотрено в [10–13].

В данной работе предлагается использовать комбинацию моделей символьной регрессии [14] и нейронной сети с целью достижения максимальной точности прогноза при одновременном уменьшении вычислительной сложности. Метод символьной регрессии заключается в нахождении как можно более точной и простой суперпозиции признаков при оговоренных ограничениях на ее максимальную сложность. Каждая суперпозиция генерируется при помощи грамматики порождения функций на основе элементарных формул и представляется в виде дерева, по которому восстанавливается конечная формула. При этом модель может оказаться экспертно-интерпретируемой, т. е. ее вид и свойства допускают физическую интерпретацию.

На первом этапе построения комбинированной модели отыскиваются несколько лучших суперпозиций исходных признаков. Для этого используется генетический алгоритм. На втором этапе строится нейронная сеть с одним скрытым слоем, на вход которой подаются полученные суперпозиции.

Для проверки точности и оценки эффективности алгоритма используется кросс-валидация. Предложенная модель тестируется на четырех различных типах реальных физических измерений: данные исследования керна и данные [15–17] из других инженерных приложений. В экспериментах сравнивается точность работы комбинированной модели и обычной нейросети с одним скрытым слоем. Также проведено сравнение с моделями, построенными по методам Lasso, SVM (support vector machine), градиентного бустинга [18]. Помимо уменьшения числа нейронов скрытого слоя, нужных для достижения одной и той же точности, наблюдается устойчивое улучшение максимальной точности при использовании комбинированной модели.

2 Постановка задачи аппроксимации выборки

Задана выборка $D = \{(\mathbf{x}_i, y_i)\}_{i=1}^m$, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$, $y_i \in \mathbb{R}$. Необходимо найти функцию $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ из семейства моделей \mathcal{F} , удовлетворяющую минимуму заданной функции потерь Q :

$$f^* = \arg \min_{f \in \mathcal{F}} Q(f, D), \quad (1)$$

где

$$Q = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - f(\mathbf{x}_i))^2}. \quad (2)$$

Задача символьной регрессии. Ищутся всевозможные допустимые суперпозиции экспертно-заданных функций над грамматикой G :

$$B(g, g) | U(g) | S,$$

где B — множество бинарных операций $\{+, -, *, /\}$; U — множество унарных операций $\{\ln, x^\alpha, \exp\}$; S — множество исходных переменных. Допустимой назовем суперпозицию, удовлетворяющую следующим требованиям:

- (1) элементами могут являться только порождающие функции g и свободные переменные;
- (2) число аргументов элемента суперпозиции равно числу аргументов используемой функции;
- (3) порядок аргументов соответствует порядку аргументов функции;
- (4) область определения следующей функции в суперпозиции включает в себя область значений текущей.

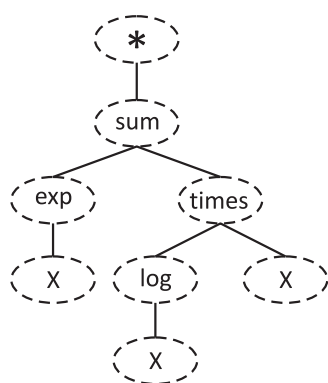


Рис. 1 Пример дерева суперпозиции $f = e^x + x \ln x$

Каждой суперпозиции f сопоставляется дерево суперпозиции Γ_f . Каждой элементарной функции сопоставляется внутренняя вершина, а каждой независимой переменной сопоставляется лист в дереве (рис. 1). Глубиной дерева суперпозиции считается длина самого длинного пути от корня до листа дерева. Задача нахождения оптимального дерева суперпозиции ставится в виде задачи (1), где \mathcal{F} — множество всех допустимых суперпозиций, имеющих глубину не выше заданной константы k .

Дерево суперпозиции представляется в виде матрицы смежности. Поиск графа, минимизирующего функцию потерь, является NP-сложной задачей [19], поэтому предлагается приближенное решение, заключающееся в построении искомого дерева в результате поиска генетическим алгоритмом. Начальная популяция допустимых моделей создается случайным образом.

При использовании генетического алгоритма возможно застревание в локальных минимумах функции потерь, поэтому во время вычислительного эксперимента используется мультистарт (алгоритм запускается несколько раз и выбирается наилучшая модель).

Комбинация символьной регрессии и нейронной сети. Для повышения качества прогноза строится нейросеть, имеющая в качестве нейронов входного слоя суперпозиции признаков, полученные при помощи представленного выше

Генетический алгоритм построения суперпозиций

- 1: **while** не достигнута требуемая точность **do**
 - 2: Из множества \mathcal{F} выбирается некоторое подмножество моделей, лучших в смысле функционала (2).
 - 3: Две случайно выбранные модели меняются случайными поддеревьями, условие допустимости должно удовлетворяться.
 - 4: Произвольно выбранное поддерево удаляется и заменяется на новое случайное поддерево при условии фиксированной максимальной сложности.
 - 5: Порожденные модели добавляются в \mathcal{F} .
 - 6: **end while**
-

генетического алгоритма. Входной и скрытый слои имеют сигмоидную функцию активации. Полученная структура описывается формулой:

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \sigma \left(\sum_{m=1}^M \sigma \left(\sum_{n=1}^N u_n g_n(\mathbf{x}) + u_0 \right) + w_0 \right), \quad (3)$$

где M — число нейронов скрытого слоя; N — число нейронов входного слоя. В случае обычной нейронной сети $g_n(\mathbf{x})$ — исходные признаки, а в случае суперпозиции — построенные в результате символьной регрессии функции. Нейронная сеть настраивается методом обратного распространения ошибки на тех же данных, на которых обучалась модель символьной регрессии.

3 Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент проводился для нескольких моделей.

1. **Нейронная сеть.** В этом случае значения функций $g_n(\mathbf{x})$ являются исходными признаками. Варьировалось число нейронов скрытого слоя в диапазоне от 1 до 30.
2. **Символьная регрессия и нейронная сеть.** Пять раз запускался генетический алгоритм, полученные топ-5 функций использовались в качестве функций $g_n(\mathbf{x})$.
3. **Lasso, SVM и градиентный бустинг** сравнивались с нейронной сетью.

Проверка качества проводилась на кросс-валидации:

$$CV(K) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Q(f_k, D \setminus C_k), \quad (4)$$

где C_k — $(K - 1)/K$ доля выборки, используемая для настройки модели f_k . Сравнение комбинации и нейронной сети также проводилось при помощи коэффициента детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - f(\mathbf{x}_i))^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2},$$

где $\bar{y} = (1/n) \sum_{i=1}^m y_i$

Эксперимент был поставлен на четырех реальных выборках: данные измерения керна, результаты продувки крыла, состав бетона и гидродинамические параметры яхт. Признаки предварительно были нормализованы к нулевому математическому ожиданию и единичной дисперсии. Код доступен по ссылке [20].

Данные измерения керна. Данные керна — лабораторные измерения различных физических свойств образца горной породы, извлеченного на поверхность. Выборка состоит из 300 образцов керна и 4 признаков: глубины извлечения

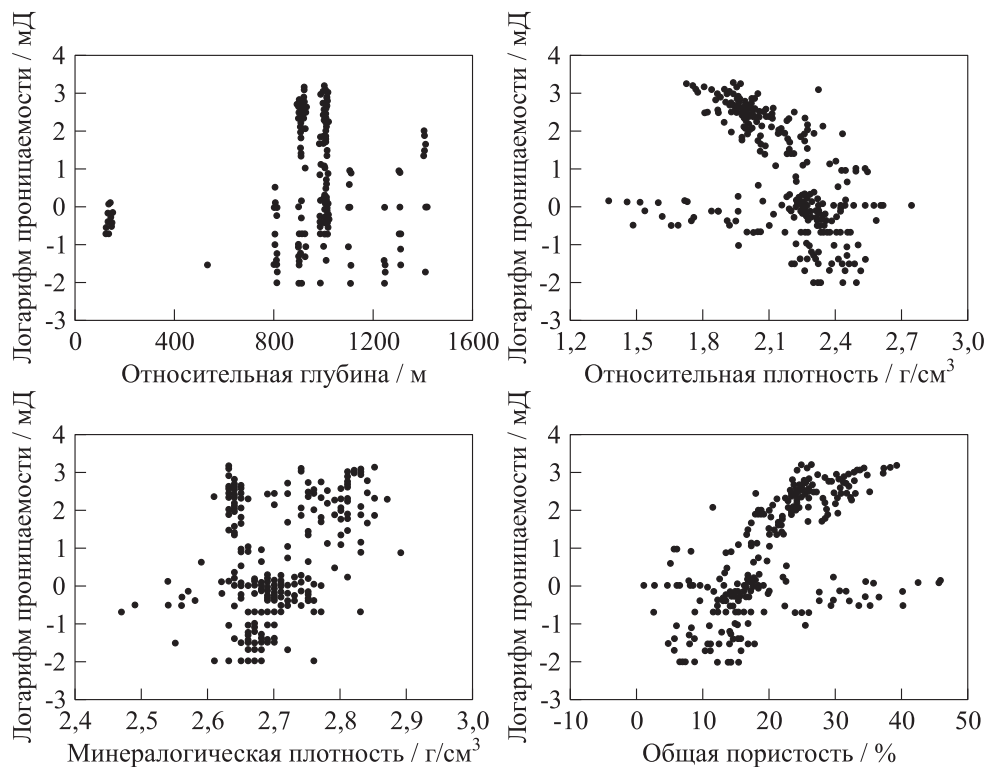


Рис. 2 Данные керна

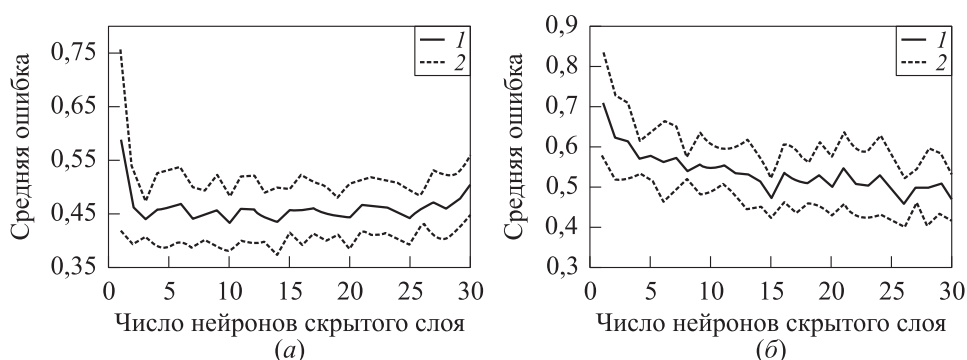


Рис. 3 Предсказание проницаемости: (а) нейронная сеть и символьная регрессия; (б) нейронная сеть; 1 — ошибка; 2 — отклонение

образца, объемной плотности, минералогической плотности и общей пористости. Интервал изменения глубины составляет 1300 м. На рис. 2 представлены графики, визуализирующие выборку.

На рис. 3 изображен график среднеквадратичной ошибки в зависимости от числа нейронов скрытого слоя в случае обычной нейронной сети и предлагаемой авторами комбинации с символьной регрессией (3). Пунктиром показано стандартное отклонение от среднего.

На рис. 4 изображен коэффициент детерминации в зависимости от числа нейронов для обоих случаев. Видно, что при одинаковом качестве число нейронов скрытого слоя существенно уменьшается при использовании комбинации символьной регрессии и нейронной сети.

Airfoil. Выборка «Airfoil Self Noise» [15] представляет собой результаты аэродинамических и акустических тестов во время продувки крыла в аэротрубе. Данные были использованы в работе [21]. Всего в выборке 1503 образца и 5 признаков. Требуется предсказать уровень шума в децибелах. Результаты представлены на рис. 5–7.

Concrete. В выборке «Concrete Compressive Strength» [16] представлены данные зависимости сопротивления сжатия бетона от его состава. Данные были проанализированы в работе [22]. Всего в выборке 1030 объектов и 8 признаков. Требуется предсказать максимально возможную нагрузку на образец. Результаты представлены на рис. 8–10.



Рис. 4 Зависимость коэффициента детерминации от числа нейронов скрытого слоя: 1 — комбинация; 2 — нейронная сеть

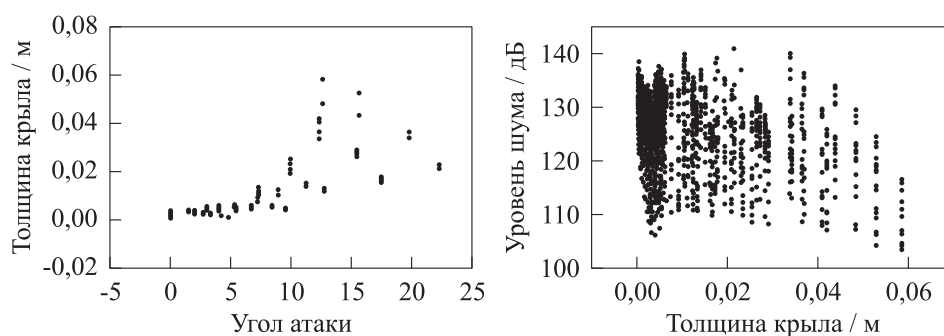


Рис. 5 Данные Airfoil

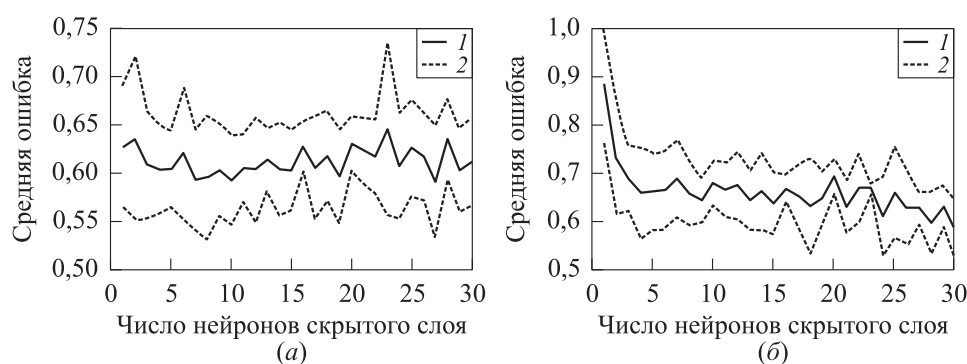


Рис. 6 Ошибки предсказания уровня шума: (а) нейронная сеть и символьная регрессия; (б) нейронная сеть; 1 — ошибка; 2 — отклонение

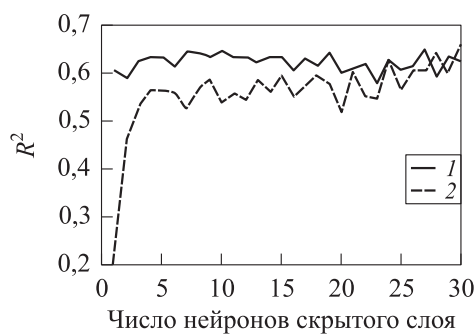


Рис. 7 Зависимость коэффициента детерминации от числа нейронов скрытого слоя: 1 — комбинация; 2 — нейронная сеть

Yacht Hydrodynamics. Выборка «Yacht Hydrodynamics» [17] была использована в работе [23]. Задачей является определение остаточного сопротивления яхты в зависимости от ее физических характеристик.

В выборке представлено 308 объектов и 7 признаков. Для этой выборки некоторые функции, полученные с помощью символьной регрессии, выглядят особенно просто, например

$$g(\mathbf{x}) = \frac{e^{x_5} - \sqrt{2}}{\sqrt{2}},$$

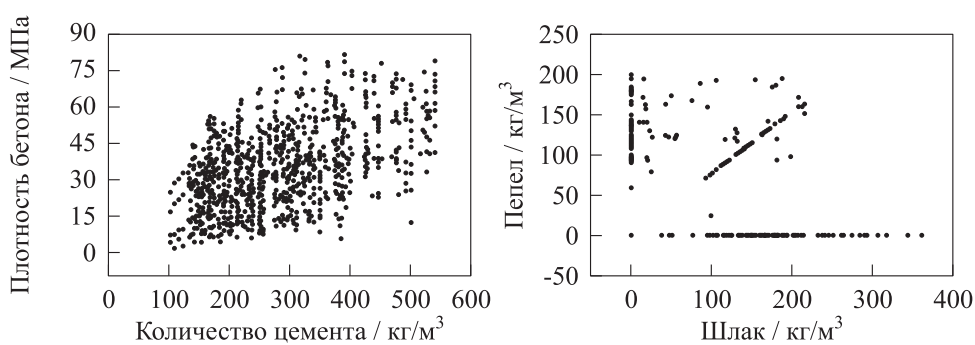


Рис. 8 Данные Concrete

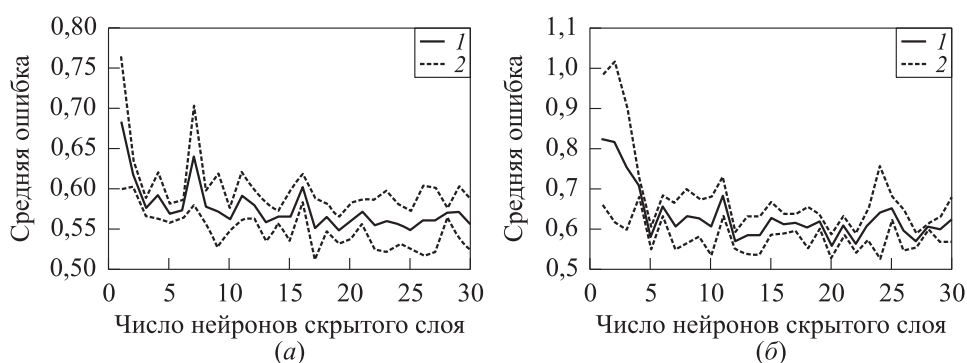


Рис. 9 Ошибки предсказания максимально возможной нагрузки на образец: (а) нейронная сеть и символьная регрессия; (б) нейронная сеть; 1 — ошибка; 2 — отклонение

где x_5 соответствует числу Фруда. Результаты представлены на рис. 11–13.

Таблица суммирует результаты вычислительного эксперимента, в ней показаны ошибки (4) и стандартные отклонения каждой модели на использованных выборках. Видно, что практически на всех выборках предложенный алгоритм не уступает другим алгоритмам и превосходит обычную нейронную сеть по точности. Также графики коэффициента детерминации отчетливо показывают резкое уменьшение числа нейронов, необходимых для комбинированной модели.

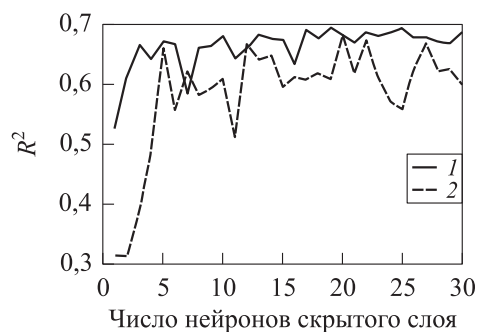


Рис. 10 Зависимость коэффициента детерминации от числа нейронов скрытого слоя: 1 — комбинация; 2 — нейронная сеть

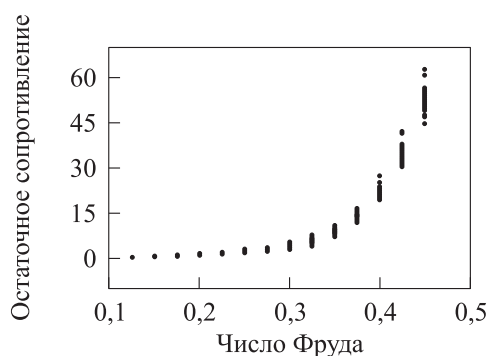


Рис. 11 Данные Yacht Hydrodynamics

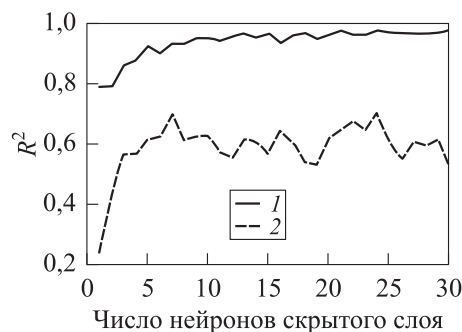


Рис. 12 Зависимость коэффициента детерминации от числа нейронов скрытого слоя: 1 — комбинация; 2 — нейронная сеть

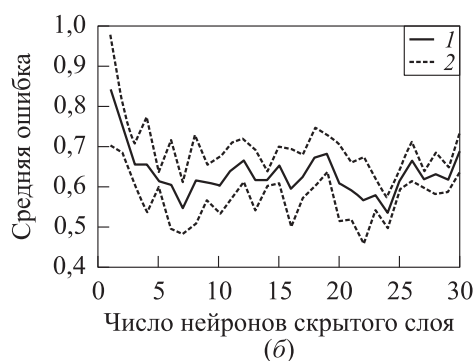


Рис. 13 Ошибки предсказания остаточного сопротивления яхты: (а) нейронная сеть и символьная регрессия; (б) нейронная сеть; 1 — ошибка; 2 — отклонение

Среднеквадратичная ошибка для различных моделей

Выборка	Lasso	SVM	Бустинг	Нейронная сеть	Комбинация
Керн	$0,64 \pm 0,03$	$0,42 \pm 0,08$	$0,46 \pm 0,03$	$0,47 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,05$
Airfoil	$0,7 \pm 0,01$	$0,48 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,02$	$0,6 \pm 0,02$	$0,61 \pm 0,01$
Concrete	$0,63 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,02$	$0,50 \pm 0,01$	$0,54 \pm 0,03$	$0,55 \pm 0,01$
Yacht	$0,43 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,03$	$0,24 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,02$	$0,15 \pm 0,02$

4 Заключение

Предложен алгоритм построения комбинации нейронной сети и символьной регрессии. При помощи символьной регрессии построены экспертно-интерпретируемые модели, удовлетворяющие требуемой точности, проведен вычислительный эксперимент на четырех выборках. Показано существенное уменьшение числа нейронов скрытого слоя нейронной сети при использовании функций, полученных в результате символьной регрессии, в качестве нейронов входного слоя.

Литература

1. *Bear J.* Dynamics of fluids in porous media. — Courier Corp., 2013. 459 p.
2. *Watson A. T., Richmond P. C., Kerig P. D.* A regression-based method for estimating relative permeabilities from displacement experiments // SPE Reservoir Eng., 1988. Vol. 3. No. 3. P. 953–958.
3. *Ibrahim M. N., Koederitz L. F.* Two-phase relative permeability prediction using a linear regression model // SPE Eastern Regional Meeting. — Society of Petroleum Engineers, 2008. ID: SPE-65631. 11 p. doi: 10.2118/65631-MS.
4. *Cozzi M., Ruvo L., Scaglioni P.* Core-data preprocessing to improve permeability-log estimation // SPE Reserv. Eval. Eng., 2007. Vol. 10. No. 5. P. 563–570.
5. *Akande K. O., Olatunji S. O., Owolabi T. O.* Comparative analysis of feature selection-based machine learning techniques in reservoir characterization // SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition. — Society of Petroleum Engineers, 2015. ID: SPE-178006-MS. 21 p. doi: 10.2118/178006-MS.
6. *Al-Mudhifar W. J.* Integrating Bayesian model averaging for uncertainty reduction in permeability modeling // Offshore Technology Conference, 2015. ID: SPE-25646-MS. 10 p. doi: 10.4043/25646-MS.
7. *Al-Mudhifar W. J.* Comparison of permeability estimation models through Bayesian model averaging and LASSO regression // Abu Dhabi Petroleum Exhibition and Conference (International). — Society of Petroleum Engineers, 2015. ID: SPE-177556-MS. 17 p. doi:10.2118/177556-MS.
8. *Xue G., Datta-Gupta A., Valko P.* Optimal transformations for multiple regression: Application to permeability estimation from well logs // SPE Formation Eval., 1997. Vol. 12. No. 2. P. 85–94.
9. *Al-anazi A. F., Gates I. D.* Support-vector regression for permeability prediction in a heterogeneous reservoir: A comparative study // SPE Reserv. Eval. Eng., 2010. Vol. 13. No. 3. P. 485–495.
10. *Guler B., Ertekin T., Grader A. S.* An artificial neural network based relative permeability predictor // J. Can. Petrol. Technol., 2003. Vol. 42. No. 4. P. 49–57. doi: 10.2118/03-04-02.
11. *Aminian K., Ameri S., Oyerokun A.* Prediction of flow units and permeability using artificial neural networks // SPE Western Regional/AAPG Pacific Section Joint Meeting. — Society of Petroleum Engineers, 2003. ID: SPE-83586-MS. 7 p. doi: 10.2118/83586-MS.

12. *Shokir E. M., Alsughayer A. A., Al-Ateeq A.* Permeability estimation from well log responses // *J. Can. Petrol. Technol.*, 2006. Vol. 45. No. 11. P. 41–46. doi: 10.2118/06-11-05.
13. *Maslennikova Y.* Permeability prediction using hybrid neural network modelling // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. — Society of Petroleum Engineers, 2013. ID: SPE-167640-STU. 6 p. doi: 10.2118/167640-STU.
14. *Рудоѝ Г. И., Стрижов В. В.* Алгоритмы индуктивного порождения суперпозиций для аппроксимации измеряемых данных // *Информатика и её применения*, 2013. Т. 7. Вып. 1. С. 44–53.
15. *Airfoil Self Noise* // UCI Machine Learning Repository. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Airfoil+Self-Noise>.
16. *Concrete Compressive Strength Data Set* // UCI Machine Learning Repository. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Concrete+Compressive+Strength>.
17. *Yacht Hydrodynamics Data Set* // UCI Machine Learning Repository. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Yacht+Hydrodynamics>.
18. *Bishop C. M.* Pattern recognition and machine learning. — Berlin: Springer, 2006. 738 p.
19. *Ghodrat M. A., Givargis T., Nicolau A.* Equivalence checking of arithmetic expressions using fast evaluation // *Conference (International) on Compilers, Architectures and Synthesis for Embedded Systems Proceedings*. — ACM, 2005. P. 147–156.
20. Код вычислительного эксперимента. <https://sourceforge.net/p/mlalgorithms/code/HEAD/tree/Group274/Bochkarev2016PermeabilityEstimation/code/Bochkarev2016PermeabilityEstimation.ipynb?format=raw>.
21. *Lopez R., Balsa-Canto E., Oñate E.* Neural networks for variational problems in engineering // *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 2008. Vol. 75. No. 11. P. 1341–1360.
22. *Yeh I. C.* Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks // *Cement Concrete Res.*, 1998. Vol. 28. No. 12. P. 1797–1808.
23. *Ortigosa I., Lopez R., Garcia J.* A neural networks approach to residuary resistance of sailing yachts prediction // *Conference (International) on Marine Engineering MARINE Proceedings*, 2007. P. 250.

Поступила в редакцию 16.06.17

GENERATION OF EXPERTLY-INTERPRETED MODELS FOR PREDICTION OF CORE PERMEABILITY

A. M. Bochkarev¹, I. L. Sofronov¹, and V. V. Strijov²

¹Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russian Federation

²A. A. Dorodnicyn Computing Centre, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: This article is devoted to prediction of core permeability. Permeability is one of the main properties for estimation of filtration of gas and liquid in core.

To build a permeability model, porosity, density, depth of measurement, and other core physical properties are used. An algorithm for choosing the optimal prediction model is proposed. The model of superpositions of expertly-defined functions is suggested. The proposed method is a superposition of previously obtained optimal expertly-defined functions and a two-layer neural network. The experiment on core analysis, aero- and hydrodynamics datasets was conducted. During the experiment, the optimal expertly-interpreted models for all datasets were derived. The suggested approach is compared to other methods for choosing models, such as Lasso regression, support vector regression (SVR), gradient boosting, and neural network. The error and optimal parameters estimation was conducted using cross-validation. The experiment showed that the proposed approach is competitive with other state-of-the-art methods. Moreover, the number of neurons is significantly reduced with the use of superpositions of expertly-defined functions.

Keywords: core permeability; generation of superposition; symbolic regression; neural network; SVR; Lasso; gradient boosting

DOI: 10.14357/08696527170307

Acknowledgments

This publication is funded by the Russian Foundation for Basic Research, award number 16-07-01155, and Russian Science Foundation, award number 15-11-00015.

References

1. Bear, J. 2013. *Dynamics of fluids in porous media*. Courier Corp. 459 p.
2. Watson, A. T., P. C. Richmond, and P. D. Kerig. 1988. A regression-based method for estimating relative permeabilities from displacement experiments. *SPE Reservoir Eng.* 3(3):953–958.
3. Ibrahim, M. N., and L. F. Koederitz. 2008. Two-phase relative permeability prediction using a linear regression model. *SPE Eastern Regional Meeting*. Society of Petroleum Engineers. ID: SPE-65631. 11 p. doi: 10.2118/65631-MS.
4. Cozzi, M., L. Ruvo, and P. Scaglioni. 2007. Core-data preprocessing to improve permeability-log estimation. *SPE Reserv. Eval. Eng.* 10(5):563–570.
5. Akande, K. O., S. O. Olatunji, and T. O. Owolabi. 2015. Comparative analysis of feature selection-based machine learning techniques in reservoir characterization. *SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. ID: SPE-178006-MS. 21 p. doi: 10.2118/178006-MS.
6. Al-Mudhafar, W. J. 2015. Integrating Bayesian model averaging for uncertainty reduction in permeability modeling. *Offshore Technology Conference*. ID: SPE-25646-MS. 10 p. doi: 10.4043/25646-MS.
7. Al-Mudhafar, W. J. 2015. Comparison of permeability estimation models through Bayesian model averaging and LASSO regression. *Abu Dhabi Petroleum Exhibition and Conference (International)*. Society of Petroleum Engineers. ID: SPE-177556-MS. 17 p. doi:10.2118/177556-MS.

8. Xue, G., A. Datta-Gupta, and P. Valko. 1997. Optimal transformations for multiple regression: Application to permeability estimation from well logs. *SPE Formation Eval.* 12(2):85–94.
9. Al-anazi, A. F., and I. D. Gates. 2010. Support-vector regression for permeability prediction in a heterogeneous reservoir: A comparative study. *SPE Reserv. Eval. Eng.* 13(3):485–495.
10. Guler, B., T. Ertekin, and A. S. Grader. 2003. An artificial neural network based relative permeability predictor. *J. Can. Petrol. Technol.* 42(4):49–57. doi: 10.2118/03-04-02.
11. Aminian, K., S. Ameri, and A. Oyerokun. 2003. Prediction of flow units and permeability using artificial neural networks. *SPE Western Regional/AAPG Pacific Section Joint Meeting*. Society of Petroleum Engineers. ID: SPE-83586-MS. 7 p. doi: 10.2118/83586-MS.
12. Shokir, E. M., A. A. Alsughayer, and A. Al-Ateeq. 2006. Permeability estimation from well log responses. *J. Can. Petrol. Technol.* 45(11):41–46. doi: 10.2118/06-11-05.
13. Maslennikova, Y. 2013. Permeability prediction using hybrid neural network modelling. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. ID: SPE-167640-STU. 6 p. doi: 10.2118/167640-STU.
14. Rudoy, G. I., and V. V. Strijov. 2013. Algoritmy induktivnogo porozhdeniya superpozitsiy dlya approksimatsii izmeryaemykh dannykh [Algorithms for inductive generation of superpositions for approximation of experimental data]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(1):44–53.
15. Airfoil Self Noise. *UCI Machine Learning Repository*. Available at: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Airfoil+Self-Noise> (accessed August 11, 2017).
16. Concrete Compressive Strength Data Set. *UCI Machine Learning Repository*. Available at: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Concrete+Compressive+Strength> (accessed August 11, 2017).
17. Yacht Hydrodynamics Data Set. *UCI Machine Learning Repository*. Available at: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Yacht+Hydrodynamics> (accessed August 11, 2017).
18. Bishop, C. M. 2006. *Pattern recognition and machine learning*. Berlin: Springer. 738 p.
19. Ghodrat, M. A., T. Givargis, and A. Nicolau. 2005. Equivalence checking of arithmetic expressions using fast evaluation. *Conference (International) on Compilers, Architectures and Synthesis for Embedded Systems Proceedings*. ACM. 147–156.
20. Experiment code. Available at: <https://sourceforge.net/p/mlalgorithms/code/HEAD/tree/Group274/Bochkarev2016PermeabilityEstimation/code/Bochkarev2016PermeabilityEstimation.ipynb?format=raw> (accessed August 11, 2017).
21. Lopez, R., E. Balsa-Canto, and E. Oñate. 2008. Neural networks for variational problems in engineering. *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 75(11):1341–1360.
22. Yeh, I. C. 1998. Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks. *Cement Concrete Res.* Elsevier. 28(12):1797–1808.
23. Ortigosa, I., R. Lopez, and J. Garcia. 2007. A neural networks approach to residuary resistance of sailing yachts prediction. *Conference (International) on Marine Engineering MARINE Proceedings*. 250.

Received June 16, 2017

Contributors

Bochkarev Artem M. (b. 1994) — student, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russian Federation; artem.bochkarev@phystech.edu

Sofronov Ivan L. (b. 1957) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russian Federation; ISofronov@slb.com

Strijov Vadim V. (b. 1967) — Doctor of Science in physics and mathematics, leading scientist, A. A. Dorodnicyn Computing Centre, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; strijov@ccas.ru

НЕКОТОРЫЕ НЕЯВНЫЕ ВОПРОСЫ СЕТЕВОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ

*В. Б. Егоров*¹

Аннотация: Сделана попытка выявить и осветить некоторые неявные вопросы сетевой виртуализации, показать разные грани модного ныне тренда виртуализации сетевых функций NFV (Network Function Virtualization). Истоки и история NFV прослежены во взаимодействии с виртуализацией серверов и виртуальными машинами. Рассмотрено соотношение виртуализации сетевых функций с собственно виртуализацией сетей. Очерчены «сферы интересов» современной технологии NFV. Отмечено взаимное тяготение друг к другу двух актуальных сетевых концепций: NFV и программно-определяемых сетей SDN (Software-Defined Networks), — основанное на единстве целевой функции отказа от проприетарного сетевого оборудования, концептуальной общности парадигмы управления и общего для обеих технологий территориального ограничения рамками центров обработки данных (ЦОД), в том числе программно-определяемых. Показаны объективные трудности на пути внедрения идеи NFV: необходимость массовой замены работоспособного оборудования, недостаточность имеющихся стандартов и незрелость коммерческих продуктов, невозможность адекватной оценки экономической эффективности, отсутствие реальных прецедентов и успешных примеров. Особое внимание уделено принципиальной недостаточности производительности NFV-решений для магистральных операторских сетей.

Ключевые слова: datacenter; NFV; SDDC; SDN; виртуализация сетевых функций; виртуальные сети; «оркестровка»; программно-определяемые сети; ЦОД

DOI: 10.14357/08696527170308

1 Введение

Виртуализации сетевых функций NFV, широко обсуждаемой, как ни парадоксально на первый взгляд, в связи не столько с виртуальными сетями, сколько с концепцией программно-определяемых сетей SDN, посвящено множество публикаций и в серьезных научных журналах, и в интернет-пространстве. Однако именно такая множественность с одними и теми же из раза в раз повторяемыми обещаниями сокращения стоимости оборудования, ускорения выхода продуктов на рынок, уменьшения потребления энергии, новых возможностей совместного владения, а также более динамичной экосистемы размывает содержание и суть

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, VEgorov@ipiran.ru

NFV. Многократно растиражированные рекламные обещания, сами по себе, может быть, и не лишены оснований, тем не менее не столько рассеивают, сколько нагоняют дополнительный туман на и так не слишком ясную сущность предмета. Кроме того, совершенно за рамками обсуждения оказывается такой, казалось бы, естественный вопрос, как соотношение виртуализации сетевых функций и собственно виртуализации сетей (network virtualization).

Настоящую статью можно рассматривать как попытку проявить в этом тумане реальные очертания NFV, причем не только с парадной, но и со скрытой взору обратной ее стороны, а также прочертить границы и найти грани соприкосновения виртуализации сетей и функций.

2 Истоки NFV

Начать, вероятно, следует с того, что смысл NFV трудно уловим, не в последнюю очередь из-за отсутствия смысла в самом словосочетании «виртуализация функций». Виртуализация всегда понималась как та или иная форма абстрагирования от реальной аппаратуры, в результате которого появлялся некий фантом, не более чем удобное представление, но фантом со вполне ощутимой функциональностью, базирующейся на реальных возможностях той самой аппаратуры. Например, в случае давно ставшей привычной виртуализации серверов (server virtualization) результатом стала виртуальная машина VM (Virtual Machine), способная выполнять вполне реальные работы за счет возможностей процессора или сервера, на котором она размещена, и обладающая способностью к фантомному «возникновению из ничего» или «миграции» на другой процессор или сервер благодаря своей виртуальности. Результатом не менее привычных примеров виртуализации сетей оказываются такие абстракции, как наложенные сети: виртуальные локальные VLAN (Virtual Local-Area Networks) или частные VPN (Virtual Private Networks), — функционирующие как настоящие поверх существующих физических сетей за счет аппаратной инфраструктуры последних, но в значительной степени индифферентные к возможным конфигурациям и реконфигурациям этой инфраструктуры благодаря своей виртуальности. Однако когда речь заходит о виртуализации сетевых функций, складывается совершенно иная ситуация: фантом возникает из фантома, исчезает физическая основа для функционирования итога виртуализации.

Если исключить чисто математическое определение функции как закона зависимости одной величины от другой, то для данного практического случая сетевой функции подойдут такие общепринятые ее определения, как работа, производимая органом или прибором, или роль, назначение чего-либо. В любом из этих определений функция предстает неким абстрактным понятием и ее виртуализация в общепринятом понимании не имеет смысла. Действительно, если отбросить словесную мишуру и вникнуть в сущность NFV, то становится очевидным, что никакая это не виртуализация, а просто программная реализация (эмуляция) функций традиционного сетевого оборудования, такого как коммута-

торы, маршрутизаторы, сетевые экраны и т. п. Таким образом, правильнее было бы говорить либо об **эмуляции сетевых функций**, либо о **виртуализации сетевых устройств**. Тем не менее словосочетание «виртуализация сетевых функций» прижилось в IT-словаре, и с этим устоявшимся насилием над здравым смыслом приходится мириться. Его даже можно объяснить.

Официально история NFV ведется с 2012 г., когда она была анонсирована Европейским институтом телекоммуникационных стандартов (ETSI, European Telecommunications Standards Institute), однако первая реализация «виртуализированной функции» появилась тремя годами раньше. Это был виртуальный коммутатор с открытым кодом Open vSwitch, который, кстати, долго оставался едва ли не единственным живым примером «виртуализации сетевых функций», хотя его создатели понятия не имели об NFV. Они решали насущную практическую задачу обеспечения адекватной сетевой поддержки виртуализации серверов. Такая поддержка множества работающих на сервере VM требовалась для распределения потоков данных и выравнивания нагрузки (load balancing) между ними. Создатели Open vSwitch нашли простое и эффективное решение задачи, реализовав требуемые функции внутри серверов соответствующим программным обеспечением (ПО), работающим на уровне гипервизора или непосредственно внутри него. Простота и эффективность такого чисто программного решения быстро привела к появлению нескольких конкурирующих продуктов. Помимо Open vSwitch, продвигаемого как открытый проект фондом Linux Foundation OvS, на рынке появились фирменные программные коммутаторы vSwitch для инфраструктуры vSphere компании VMware, платформы XenServer компании Citrix Systems, гипервизора z/VM компании IBM и др., причем все с определением «виртуальный» если не в названии, то в первых же строках презентаций. На самом деле вся их «виртуальность» сводилась к тесной функциональной связи с работающими на том же сервере виртуальными машинами. Если Open vSwitch и считать первой успешной попыткой именно виртуализации, то, разумеется, не функции, а реального сетевого устройства — коммутатора, что, собственно, и отражало название проекта (в переводе — «виртуальный коммутатор с открытым кодом»).

Весьма вероятно, что идея NFV родилась на волне успеха виртуальных коммутаторов. Поначалу она, ориентируясь на функциональность vSwitch, ограничивалась пределами одного сервера и поддержкой размещенных на нем VM. Затем функции такого рода коммутаторов помимо собственно коммутации потоков данных между VM постепенно стали дополняться другими функциями традиционных устройств сетевой инфраструктуры: шлюзов, сетевых экранов и пр. В последующем виртуализированные устройства, в целом повторяя функционал реальных, обрели дополнительную адаптивность и способность к миграциям, свойственные VM.

На момент рождения концепции NFV виртуализации уже стало тесно в рамках одного сервера. Она уверенно распространилась на целые кластеры и агрегации серверов в ЦОД и начала освоение сферы «облачных» вычислений (cloud

computing). На повестку дня вышел не просто виртуальный коммутатор типа vSwitch, а целая виртуальная сеть как важный элемент сквозной виртуализированной среды в масштабах ЦОД или «облака». Однако к тому времени понятие виртуальной сети уже было задействовано в иных контекстах VLAN и VPN. Кроме того, вероятно, авторы концепции NFV с самого начала не хотели ограничивать себя формальным программным воспроизведением функций типовых устройств сетевой инфраструктуры. Некоторые из этих функций, например резервирование полос пропускания каналов связи, для обслуживания VM были не нужны, в то же время некоторых, таких как балансировка нагрузки между VM, не хватало. К тому же принципиальная подвижность и вариативность VM предполагала у поддерживающей их виртуализированной сетевой инфраструктуры отказ от свойственных аппаратным аналогам жестких конфигураций и переход к динамичным комбинациям, только необходимых в данный момент и в данном месте функций. Все это вместе взятое, надо полагать, и привело в конечном счете к тому, что на передний план в качестве базового элементарного объекта сетевой виртуализации ЦОД и «облаков» выдвинулось не законченное сетевое устройство, а, где-то вопреки здравому смыслу, отдельная сетевая функция, породив понятие NFV. Поскольку оно прижилось, то, принимая его как данность, в дальнейшем откажемся от кавычек, говоря о виртуализации сетевых функций.

3 NFV и виртуализации сетей

К настоящему времени акроним NFV не только прижился, но и стал модным. На рынке ПО для ЦОД и «облаков» большинство продуктов, связанных с виртуализацией сети, явно или неявно вовлекают NFV. В стремлении понять действительную связь и взаимоотношение между виртуализацией сети и виртуализацией сетевых функций обратимся к опыту одного из лидеров в этой области — компании VMware, «крупнейшего разработчика ПО для виртуализации», как представляет ее Википедия.

Рекламируя на своем фирменном сайте программный продукт NSX, VMware позиционирует его как «платформу виртуализации сети для программного ЦОД» [1]. Отметив, что тут нет прямого упоминания NFV, попробуем разобраться в понимании сетевой виртуализации «крупнейшим разработчиком ПО для виртуализации», рассмотрев назначение, функциональность и особенности его основного предназначенного для этой цели продукта.

Как поясняется далее в упомянутой выше презентации на сайте VMware, NSX воспроизводит программными средствами сетевую среду, которая может включать коммутаторы, маршрутизаторы, сетевые экраны, средства балансировки нагрузки, а также компоненты для мониторинга и обеспечения качества обслуживания. Из этого перечня со всей очевидностью следует, что в данном контексте целью и результатом применения NSX оказывается не виртуализация какой-то сети, которая пока вообще никак не просматривается, а программная реализация конкретных функций, свойственных традиционным устройствам се-

тевой инфраструктуры. К тому же в дальнейшем уточняется, что эти функции реализуются в фирменном гипервизоре. Таким образом, по всем приметам речь идет как раз об NFV, хотя и без прямой ссылки на нее. Реализуемые сетевые функции здесь представлены гораздо шире по сравнению с простым виртуальным коммутатором vSwitch, и этот расширенный набор выразительно демонстрирует «сферу интересов» современной технологии NFV. С другой стороны, пока в этой сфере не видно никакой реальной сети и, как следствие, способов ее виртуализации, хотя именно виртуализация сети объявлена основным назначением платформы NSX.

Тем не менее NSX действительно предоставляет возможности виртуализации сети, но эти возможности, в свою очередь, не имеют прямого отношения к NFV. В расширенных версиях платформы, например NSX Enterprise, появляются характерные для ЦОД средства объединения нескольких физических серверов в один виртуальный и поддержка «миграции» VM с сервера на сервер. Для этого предусмотрено специальное ПО, в частности удаленный шлюз (remote gateway) и оконечный пункт виртуального туннеля VTEP (Virtual Tunnel End Point), позволяющее реализовать в многосерверном ЦОД «эластичную» виртуальную локальную сеть VXLAN (Virtual eXtensible LAN).

Сеть VXLAN, как и другие известные виртуальные сети, представляет собой наложенную сеть, отличающуюся многоуровневой инкапсуляцией кадров первичной сети в кадры вторичной. К кадру Ethernet или VLAN первичной сети добавляется VXLAN-заголовок с идентификатором виртуальной сети VNI (Virtual Network Identifier), после чего они вместе последовательно инкапсулируются в UDP (User Datagram Protocol) пакет, IP (Internet Protocol) пакет и Ethernet-кадр вторичной сети. Суммарно в «голову» кадру Ethernet/VLAN первичной сети (внутреннему кадру) добавляется 50 (для IPv4) или 70 (для IPv6) байтов заголовков плюс соответствующее количество контрольных кодов в его «хвост». Такая солидная избыточность вынужденно приносится в жертву возможности использования традиционного сетевого оборудования для физической инфраструктуры, на которую накладываются сети VXLAN. Заголовок Ethernet-кадра вторичной сети (внешнего кадра) позволяет традиционными средствами коммутировать его на втором уровне эталонной модели ISO/OSI по MAC-адресам, например ставшими привычными в многосерверных агрегациях и ЦОД коммутаторами на вершине стойки ToR (Top of Rack) или в конце ряда стоек EoR (End of Row), а инкапсулированные заголовки IP- и UDP-пакетов внешнего кадра использовать для маршрутизации на третьем и четвертом уровнях по IP-адресам и UDP-портам. При этом сохраняется независимая возможность коммутации и перенаправления кадров, в том числе средствами NFV, в рамках отдельной виртуальной сети VXLAN по ее инкапсулированным заголовкам.

Таким образом, платформа NSX является одновременно средством виртуализации и функций, и сетей, но разными методами: NFV реализуется программными продуктами платформы внутри серверов, в том числе на VM, а VXLAN — во взаимодействии специального ПО серверов с внешним традиционным сетевым

оборудованием. Именно здесь лежит коренное различие между виртуализацией сетей и функций. Любая виртуализация сети предполагает объект этой виртуализации — некую реальную физическую сеть — и неизбежно сопровождается появлением ограничительного перечня поставщиков сетевого оборудования для этой физической сети, совместимого с ПО данной конкретной платформы виртуализации. Есть такой перечень и у платформы VMware NSX (к чести последней, он достаточно широк). В противовес этому одной из главных целей и одним из главных достоинств NFV как раз является принципиальный отказ от специфического зависящего от поставщика сетевого оборудования благодаря программной реализации его функций на универсальных серверах и VM.

4 NFV и SDN

Расширение функциональности платформ виртуализации, таких как VMware NSX, за пределы одного сервера ставит вопрос о взаимодействии в многосерверном ЦОД NFV и виртуальной сети, а именно: программно эмулируемых средствами NFV устройств сетевой инфраструктуры с реальной сетевой аппаратурой, на которую накладывается, например, сеть VXLAN. В этой связи полезно обратить внимание на некоторую недостаточность перевода определения ЦОД в назначении платформы NSX в ее презентации на сайте VMware. То, что в русском переводе подается как «программный ЦОД», в англоязычном оригинале оказывается программно-определяемым ЦОД (VMware NSX is the network virtualization platform for the Software-Defined Data Center). Эта разница существенна, так как оригинал вовлекает в контекст обсуждения программно-определяемые ЦОД SDDC (Software-Defined Data Centers) и через них сети SDN.

Действительно, практически любое обсуждение ЦОД и «облаков» затрагивает так или иначе тему NFV, а та, в свою очередь, стремится привлечь SDN. В случае VMware NSX связь NFV с SDN постулирована неявно через SDDC и не пояснена. Более отчетливо оговаривает эту связь компания F5 Networks, специализирующаяся на так называемых сетях доставки приложений ADN (Application Delivery Networks): «NFV берет концепцию SDN... и приспособливает ее в помощь телекоммуникационной инфраструктуре» (NFV is taking the SDN concept... and adapting it to benefit the telecommunications application infrastructure) [2, с. 6]. Каким же образом SDN может помочь телекоммуникационной инфраструктуре, основанной на принципах NFV?

Как уже удалось выяснить, виртуализация сети и сетевых функций внутри ЦОД реализуется разными методами. Но чтобы виртуальная сеть ЦОД функционировала как единое целое, средства управления этой сетью обязаны сопрячь эти разные методы так, чтобы все виртуальные сети, например VXLAN, функционировали в полном согласии, во-первых, с активными VM, а во-вторых, с техническими возможностями и текущими настройками реальной аппаратной сетевой инфраструктуры ЦОД. Имеющийся опыт серверной виртуа-

лизации показывает, что совместное функционирование множества VM в единой виртуализированной требует централизации организации и управления неким общим диспетчером: гипервизором в рамках отдельного сервера и каким-либо специальным VM-менеджером в многосерверных ЦОД или «облаках» [3, 4]. Соответственно, когда в числе компонентов виртуализированной среды оказывается виртуальная сеть, у создателей ЦОД возникает естественное желание подчинить ее той же парадигме управления. Но как раз централизация управления сетью является главной отличительной чертой концепции SDN. Таким образом, объективное стремление к централизации управления всеми компонентами единой виртуализированной среды ЦОД или «облака» определяет взаимное тяготение NFV и SDN друг к другу.

Этому тяготению также способствует общность «ареала приложения» NFV и SDN. Широкое применение виртуализация вообще и NFV в частности находит, в первую очередь, в ЦОД. С другой стороны, в [5] было сделано важное заключение, что концепция SDN в чистом виде, несмотря на амбициозные претензии ее авторов, практически реализуема в принципиально ограниченном пространстве, в наиболее типичном случае — в пределах ЦОД. Соответственно, последний выступает, с одной стороны, общим прикладным объединителем, а с другой — пространственным ограничителем и SDN, и NFV. Поэтому неудивительно особое выделение SDDC как главного объекта применения средств виртуализации сети, таких как VMware NSX.

Также следует отметить, что NFV и SDN концептуально объединяет общая цель отказа от проприетарного сетевого оборудования, хотя средства достижения этой цели у них разные: у NFV это виртуализация оборудования, а у SDN — сокращение его номенклатуры (в пределе до простейших коммутаторов) и унификация взаимодействия с ним из управляющего центра (в частности, благодаря единому протоколу OpenFlow).

Взаимная тяга NFV и SDN друг к другу и общая для них predisposition к централизованному управлению заставляют создателей ЦОД по возможности унифицировать методы и средства такого управления. При этом, поскольку серверная виртуализация старше NFV и SDN, на практике такая унификация стремится к переносу отработанных методов и средств управления с VM на NFV и далее на SDN. В частности, в NFV и SDN легко переключались такие ставшие расхожими термины, как «виртуализация», «программируемость», «оркестровка». Так, компания F5 Networks уверяет, что «успешное внедрение NFV требует решений, которые поддерживают четыре ключевые характеристики: виртуализацию, абстрагирование, программируемость и оркестровку» (a successful NFV implementation demands solutions that support four key characteristics: virtualization, abstraction, programmability, and orchestration) [2, с. 10]. Но если виртуализация и программируемость — естественно присущие NFV качества, то менее ясна ситуация с «оркестровкой».

Никто до сих пор не дал определения «оркестровки». Но если, например, обобщить ее задачи, как они перечислены в англоязычной Википедии, то

«оркестровка» должна автоматически без человеческого участия заставить все аппаратные и программные компоненты ЦОД или «облака» работать, дополняя друг друга и в полном согласии друг с другом (цель оркестровки в традиционном ее понимании), для предоставления всем пользователям запрашиваемых ими услуг. Сколь бы сложной ни была аппаратная инфраструктура. Сколь бы многочисленными ни были компоненты ПО. Сколь бы разнообразными ни были обеспечиваемые сервисы. В общем, такая вот волшебная палочка в руках невидимого дирижера. При этом неочевидно, что имеющиеся методы и приемы «оркестровки» гомогенной среды одинаковых VM, работающих на идентичных или хотя бы похожих серверах, удастся успешно перенести на гетерогенное разнообразие виртуальных сетевых функций и тем более на физическую сеть, сеть SDN в частности, с ее разнообразными и разнородными устройствами и заданной топологией каналов связи.

5 Проблемы и перспективы NFV

Проблема «оркестровки» не единственная в перспективах NFV. Считается, что на так называемой «кривой цикла Гартнера» концепция NFV «уже прошла «пик завышенных ожиданий» и теперь стремится к «нижней точке разочарований»... Операторы делают первые практические шаги к виртуализации инфраструктуры, активно тестируют решения на базе концепции NFV. При этом чем глубже они вникают в процесс, тем больше препятствий встречают на своем пути» [6]. Причин для этого немало:

- невозможность адекватной оценки затрат на комплексную организационную трансформацию и их экономической эффективности, усугубляемую отсутствием реальных прецедентов и успешных примеров;
- необходимость массовой замены оборудования, в том числе еще вполне работоспособного;
- неполнота стандартов и, как следствие, неполная совместимость решений по виртуальным сетевым функциям;
- недостаточная для операторских сетей производительность NFV-решений.

На последнем пункте хочется остановиться особо.

В современных ЦОД от коммутаторов требуется терабитная производительность. Например, коммутаторы ToR серии Nexus 9300 компании Cisco Systems обеспечивают суммарную пропускную способность 1,28 Тбит/с, а коммутаторы EoR серии Nexus 9508 — до 30 Тбит/с. В то же время создатели Open vSwitch оценивали его пропускную способность максимально в 500 Мбит/с [7]. Разница на 3–5 порядков (!) заставляет более пристально взглянуть на «технические параметры» NFV.

Для хотя бы приблизительной оценки верхней границы производительности NFV-коммутатора или маршрутизатора можно взять коммерческое устройство

с программной реализацией функции коммутации и маршрутизации, например универсальное устройство защиты от угроз UTM (Unified Threat Management) NEO 340 компании «АльтЭль» [8]. Это устройство реализовано на современной аппаратной платформе серверного класса с двумя процессорами Intel Xeon E5 (суммарно 16 ядер). Максимальная пропускная способность устройства в режиме простой маршрутизации без собственно функций UTM не превышает 18,5 Гбит/с (включение UTM-функций уменьшает ее на порядки величины). Далее следует учесть, что NEO 340 не имеет прямого отношения к NFV, так как представляет собой специализированное устройство, все аппаратные ресурсы и ПО которого полностью задействованы на выполнение сетевых функций. (Компания «АльтЭль» вообще позиционирует устройства линейки NEO как «аппаратную реализацию» UTM-функций, что, однако, не соответствует действительности и, вероятно, должно восприниматься как подчеркивание оппозиции NFV.) Если же в концепции NFV поручить выполнять ту же работу аналогичному ПО, но на VM в универсальном сервере, имеющем производительность, сопоставимую с производительностью аппаратной платформы NEO 340, то с учетом разделения ресурсов сервера и накладных расходов его виртуализации пропускная способность NFV-устройства окажется еще ниже. Вероятно, достаточно реалистичной оценкой верхней границы пропускной способности такого устройства будет 10 Гбит/с. В результате производительность виртуальных коммутаторов и маршрутизаторов в большинстве случаев оказывается недостаточной для работы в ЦОД, причем речь может идти о многих порядках величины. Это означает, что NFV при всей своей привлекательности отнюдь не универсальна и далеко не всегда способна обеспечить виртуальные функционально эквивалентные аналоги традиционных аппаратных решений.

6 Заключение

Таким образом, NFV наперекор названию выступает скорее дополнительным средством серверной, а не сетевой виртуализации. С виртуализацией сетей она связана только косвенно и только в рамках ЦОД, да и то лишь в том случае, если сеть строится на принципах SDN. В этом, пожалуй, можно искать объяснение того отмеченного выше феномена, что NFV обсуждается в основном в связи с программным определением, а не с виртуализацией сетей.

Пропускная способность эмулируемых NFV сетевых устройств ограничена и вряд ли когда-либо достигнет значений, необходимых в операторских сетях и сетях ЦОД. И это ограничение тоже заставляет отнести NFV скорее к области серверной, чем сетевой виртуализации.

С учетом недостаточности стандартов и имеющихся коммерческих продуктов трудно делать прогнозы относительно времени прохождения NFV «нижней точки разочарований» цикла Гартнера. Сегодня надежды на будущее NFV, с учетом объективных ограничений, связываются с эталонной моделью менеджмента и «оркестровки» MANO (Management and Orchestration), разрабатываемой

ETSI. Однако пока модель лишь включает некие концептуальные блоки, но их реализация отдается на откуп поставщикам решений, а интерфейсы взаимодействия между блоками не стандартизированы.

Литература

1. VMware NSX — это платформа виртуализации сети для программного ЦОД // VMware. <http://www.vmware.com/ru/products/nsx.html>.
2. *Yue F.* Network functions virtualization — everything old is new again // F5 Networks. White Paper, 2013. <http://interact.f5.com/rs/f5/images/F5%20NFV%20white%20paper.pdf>.
3. Virtual Machine Manager. [https://technet.microsoft.com/en-us/library/gg610610\(v=sc.12\).aspx](https://technet.microsoft.com/en-us/library/gg610610(v=sc.12).aspx).
4. Oracle VM Manager. <http://www.oracle.com/technetwork/server-storage/vm/overview/ovm-211034.html>.
5. *Егоров В. Б.* Некоторые вопросы практической реализации концепции SDN // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 1. С. 109–120.
6. *Змеев Д.* 10 причин медленной адаптации технологии NFV // SDNBLOG, 2016. <https://sdnblog.ru/ten-nfv-adoption-challenges>.
7. *Pfaff B., Pettit J., Koponen T., Amidon K., Casado M., Shenker S.* Extending networking into the virtualization layer, 2009. <http://openvswitch.org/papers/hotnets2009.pdf>.
8. Характеристики моделей Altel Neo. <http://www.altell.ru/products/neo/stats>.

Поступила в редакцию 18.04.17

SOME IMPLICIT ISSUES OF NETWORK VIRTUALIZATION

V. B. Egorov

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences

Abstract: An attempt is made to expose and elucidate some implicit issues of network virtualization. Various facets of the modern network function virtualization (NFV) trend are revealed. Contiguity of the virtual networking and NFV is discussed. The NFV sources and history are observed in interaction with server virtualization and virtual machines. “The sphere of interests” of the modern NFV technology is outlined. Mutual inclination of two actual network concepts — NFV and software-defined networking — is stated on the basis of the following common objectives: refusal of proprietary network equipment, commonality of the centralized control paradigm, and the spatial limitation within data centers (including software-defined data centers). A number of

impartial obstacles in the NFV practical deployment are shown: necessity to massively replace available equipment, insufficiency of the standard support, impossibility to estimate cost efficiency, and absence of real precedents and successful implementation examples. Special attention is paid to the performance inadequacy of NFV solutions for data centers' networks.

Keywords: network function virtualization (NFV); network orchestration; software-defined networks (SDN); virtual networks

DOI: 10.14357/08696527170308

References

1. VMware NSX — eto platforma virtualizatsii seti dlya programmnoogo COD [VMware NSX — the network virtualization platform for a software datacenter]. Available at: <http://www.vmware.com/ru/products/nsx.html/> (accessed April 4, 2017).
2. Yue, F. 2013. Network functions virtualization — everything old is new again. *F5 Networks*. White Paper. Available at: <http://interact.f5.com/rs/f5/images/F5%20NFV%20white%20paper.pdf/> (accessed April 4, 2017).
3. Virtual Machine Manager. Available at: [https://technet.microsoft.com/en-us/library/gg610610\(v=sc.12\).aspx/](https://technet.microsoft.com/en-us/library/gg610610(v=sc.12).aspx/) (accessed April 4, 2017).
4. Oracle VM Manager. Available at: <http://www.oracle.com/technetwork/server-storage/vm/overview/ovm-211034.html/> (accessed April 4, 2017).
5. Egorov, V. B. 2016. Nekotorye voprosy prakticheskoy realizatsii kontseptsii SDN [Some issues of the SDN concept practical implementation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(1):109–120.
6. Zmeev, D. 2016. 10 prichin medlennoy adaptatsii tekhnologii NFV [Ten causes of slow adaptation of the NFV technology]. Available at: <https://sdnblog.ru/ten-nfv-adoption-challenges/> (accessed April 4, 2017).
7. Pfaff, B., J. Pettit, T. Koponen, K. Amidon, M. Casado, and S. Shenker. 2009. Extending networking into the virtualization layer. Available at: <http://openvswitch.org/papers/hotnets2009.pdf/> (accessed April 4, 2017).
8. Kharakteristiki modeley Altell Neo [The characteristics of Altell Neo models]. Available at: <http://www.altell.ru/products/neo/stats/> (accessed April 4, 2017).

Received April 18, 2017

Contributor

Egorov Vladimir B. (b. 1948) — Candidate of Science in technology, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; VEgorov@ipiran.ru

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТА СИНЕРГИИ В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

И. А. Кириков¹, А. В. Колесников², С. В. Листопад³, С. Б. Румовская⁴

Аннотация: Сложные задачи управления и принятия решений в социально-технических системах требуют привлечения коллективного интеллекта: совещаний экспертов за круглым столом, гибридных интеллектуальных многоагентных систем (ГиИМАС) — моделей обсуждения в малых группах или виртуальных гетерогенных коллективов, где совместно участвуют реальные и «искусственные» эксперты (аватары). Работа коллективного интеллекта над сложными задачами — многоэтапный процесс переговоров и обмена решениями, для эффективной организации которого необходим инструментарий, отражающий состояние коллективного процесса решения сложных задач. Рассматриваются существующие методы и модели оценки эффекта синергии и предлагается метод его оценки в ГиИМАС.

Ключевые слова: управление; принятие решений; малая группа экспертов; гибридная интеллектуальная многоагентная система; эффект синергии; метод измерения синергии

DOI: 10.14357/08696527170309

1 Введение

Решение сложных задач естественным, искусственным или гетерогенным коллективом редко соответствует идеальной схеме, когда каждый участник в равной мере поддерживает дискуссию на всем ее протяжении [1]. Спокойное обсуждение чередуется с периодами хаоса, когда процесс принятия решений идет «вразнос» и может досрочно завершиться без принятия удовлетворительного решения. В такие моменты необходим инструментарий, позволяющий идентифицировать

¹Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, baltbipiran@mail.ru

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта; Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, avkolesnikov@yandex.ru

³Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ser-list-post@yandex.ru

⁴Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sophiyabr@gmail.com

и наглядно представить ситуацию принятия решений, чтобы все участники коллектива могли понять позицию других экспертов и скорректировать свое поведение. В настоящей работе эффективность протекания коллективных процессов при решении сложных задач оценивается с точки зрения проявления синергии, когда интегрированное решение качественно лучше тех, которые могли бы найти члены коллектива, работая порознь. Исследование проводится на компьютерной модели коллектива экспертов, решающего сложные задачи, — ГиИМАС.

Синергия проявляется в огромном разнообразии явлений, изучаемых различными научными дисциплинами. К основополагающим можно отнести труды таких ученых, как К. Л. Морган, Я. Сматс, У. М. Уилер, А. А. Богданов, Л. Берталанди, К. Боулдинг, У. Р. Эшби, А. Рапопорт, А. Кестлер, Д. Г. Миллер. Знания в области разработки синергетических интеллектуальных систем изучены, обобщены и опубликованы в работах А. Н. Борисова, А. В. Гаврилова, И. А. Кирикова, А. В. Колесникова, Д. А. Поспелова, Г. В. Рыбиной, В. Б. Тарасова, Н. Г. Ярушкиной, С. Гунэтилэйка, С. Кхеббала, Л. Медскера.

Моделирование, измерение и визуализация синергии в коллективах, решающих сложные задачи, и их компьютерных моделях качественно меняет субъект управления, образуя обратную связь, необходимую для возникновения самоорганизации, адаптации, гомеостаза и др. За счет этого повышается доверие членов коллектива к результатам его работы и обеспечивается мотивация к реализации принятого решения. Данный аспект оценки и визуализации синергии особенно актуален в виртуальных гетерогенных коллективах, когда реальные эксперты и искусственные элементы-аватары образуют единую систему [2].

2 Эффект синергии в коллективном принятии решений

Синергия — взаимодействие двух или более факторов, характеризующееся тем, что их действие существенно превосходит эффект каждого отдельного компонента в виде их простой суммы [3]. Встречаются и другие определения, например: синергия — возрастание эффективности деятельности в результате соединения, интеграции отдельных частей в единую систему [4].

Синергетика как наука изучает нелинейные и неравновесные системы, в которых внешние или внутренние флуктуации при определенных условиях вызывают спонтанный морфогенез [5, 6]. С точки зрения синергетики основная предпосылка развития — неустойчивость сложной системы, ее нахождение в критической области (вблизи точек бифуркации), где вследствие резкого роста неопределенности повышается вероятность образования структур с новыми качествами. Считается, что впервые термин «синергия» как таковой, или «синергизм», был введен английским физиологом Ч. Шерингтоном в ходе исследования мышечных систем и управления ими со стороны спинного мозга [7]. Синергетическим он называл согласованное воздействие нервной системы (спинного мозга) при управлении мышечными движениями. Улам рассматривал синергетическое взаимодействие

электронной машины и ее оператора [8]. В экономическом смысле термин «синергия» был впервые употреблен И. Ансовым для обоснования групповых структур в организации компаний [9].

Считается, что Г. Уотсон впервые провел исследования синергии в коллективном решении задач, которые показали, что оно превосходит индивидуальное в тесте на построение слов [10]. Потенциал для достижения эффекта синергии присутствует в любом коллективе [11], но его реализация зависит от способности участников выстраивать взаимодействие. Метаанализ эффективности работы коллективов показал, что «кооперативные группы», члены которых договариваются и ищут консенсус, значительно более эффективны, чем «конкурентные группы», цели членов которых конфликтуют или используют правило большинства для формирования коллективного решения [12].

Штейнер рассматривает синергию через призму удовлетворения требований задачи имеющимися у членов коллектива ресурсами, включающими знания, умения, навыки и инструменты, необходимые для решения задачи [13]. Потенциальная эффективность — сумма имеющихся ресурсов у эксперта. Чтобы коллектив достиг максимальной эффективности, его эксперты должны быть готовы использовать свои ресурсы для удовлетворения требований задачи. Если фактическая эффективность коллектива меньше потенциальной, имеют место «издержки процесса интеграции экспертов», в противном случае возникает «прибыль от процесса», т. е. синергия [14].

3 Методы измерения эффекта синергии

Вопросы количественного измерения величины синергетического эффекта рассматриваются преимущественно в исследованиях по теории организаций. Так, в [15] предложена концепция синергетической организации (СО), т. е. открытой, интегрированной или гибридной, развивающейся организации (мета-организации), в которой исходные организации-партнеры, работающие в сложной, динамической, плохо определенной конкурентной среде (т. е. находящиеся вблизи точек бифуркации и способные под воздействием самых незначительных факторов сильно изменять свое состояние), взаимодействуют, формируя новые, быстроменяющиеся организационные структуры [16]. Возникающие в СО нелинейные связи между партнерами обеспечивают супераддитивность общего эффекта, тесно связанную с реализацией и оценкой организационных инноваций.

Обычно в СО за счет наличия множества неоднородных организаций происходит компенсация их недостатков и усиление достоинств [17, 18]. Возникающие механизмы кооперативного взаимодействия приводят к синхронизации процессов у разных партнеров и формированию у них когерентного поведения. В результате проявляются резонансные эффекты, когда прибыль и конкурентоспособность партнеров многократно возрастают. Синергия потенциально возможна во многих слияниях или объединениях организаций. Наиболее важные вопросы связаны

с оценкой величины этой синергии и определения цены, которую стоит за нее платить покупателю.

Изучение видов синергетических эффектов и взаимосвязей между подразделениями организации позволило разработать метод оценки синергетического эффекта с использованием экспертных оценок [4]. В соответствии с этим методом необходимо выявить факторы, влияющие на достижение синергетического эффекта, на основе экспертной оценки по алгоритму, предложенному в [4], определить вес каждого из них и вычислить эффект синергии по формуле:

$$C_{\text{эо}} = \left(\sum_{i=1}^n \bar{B}_i \beta_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \beta_i \right)^{-1},$$

где \bar{B}_i — средняя балльная оценка по i -му синергетическому фактору; β_i — вес i -го синергетического фактора; n — число синергетических факторов.

В [19] количественную оценку синергетического эффекта от объединения организаций предлагается выполнять на основе их стоимости до и после слияния. Оценка стоимости компаний базируется на трех основных подходах: затратный; рыночных сравнений (аналоговый); доходный.

При использовании затратного подхода оценка синергии от объединения организаций в кластер рассчитывается как изменение их суммарной стоимости:

$$C_m = \sum_{i=1}^n CK_i^2 - \sum_{i=1}^n CK_i^1, \quad (1)$$

где CK_i^1 — рыночная стоимость собственного капитала i -го предприятия до вхождения в кластер с учетом соответствующего коэффициента инфляции; CK_i^2 — рыночная стоимость собственного капитала i -го предприятия, функционирующего в составе кластера; n — число предприятий в кластере.

Синергетический эффект кластера может вычисляться методом рыночных сравнений по котировочной стоимости акций предприятия. Эффективное взаимодействие предприятий в кластере должно приводить к росту котировок акций участников кластера, тогда синергетический эффект определяется выражением:

$$C_{\text{рскс}} = \sum_{i=1}^n \Psi_i^2 - \sum_{i=1}^n \Psi_i^1, \quad (2)$$

где Ψ_i^1 — рыночная стоимость чистых активов i -го предприятия до вхождения в кластер с учетом коэффициента инфляции; Ψ_i^2 — рыночная стоимость чистых активов i -го предприятия, функционирующего в рамках кластера.

Согласно [19], наиболее точную оценку синергетического эффекта кластера обеспечивает доходный подход к оценке стоимости компаний, так как суммарная прибыль предприятий кластера — следствие диффузии инноваций внутри

кластера, развития родственных и поддерживающих компаний, стимулирования конкуренции между компаниями инновационного кластера и ряда других условий. При использовании данного метода доходность организации оценивается как суммарная чистая прибыль и амортизационные отчисления в результате реализации ее инвестиционных проектов [19]. Синергетический эффект в этом случае вычисляется по формуле:

$$C_{\text{дп}} = \sum_{i=1}^n D_i^2 - \sum_{i=1}^n D_i^1, \quad (3)$$

где D_i^1 — доходность i -го предприятия до вхождения в кластер; D_i^2 — доходность i -го предприятия после вхождения в кластер.

При использовании стоимостных показателей для оценки синергетического эффекта нужно учитывать, что они изменяются под воздействием факторов, не связанных с развитием интеграционных отношений между участниками кластера. Поэтому применение подходов (1)–(3) невозможно без использования системы коэффициентов, характеризующих степень взаимодействия участников кластера как сути и условия синергетического эффекта [19].

В табл. 1 приведены достоинства и недостатки рассмотренных методов оценки эффекта синергии.

Анализ табл. 1 позволяет сделать вывод о том, что среди рассмотренных методов оценки синергетического эффекта от объединения организаций лучшим следует признать доходный подход. Путем несложных манипуляций он может быть адаптирован и к оценке эффекта синергии в ГиИМАС, моделирующих работу коллектива экспертов по решению сложных задач.

По аналогии с организациями, которые выбирают и реализуют альтернативные инвестиционные проекты, приносящие определенный доход, ГиИМАС выбирает альтернативные решения сложной задачи. Качество решения может оцениваться по одному или нескольким параметрам. В последнем случае, чтобы строго упорядочить решения, требуется перейти к однокритериальной оценке решений с помощью, например, метода свертки критериев. В результате можно адаптировать доходный метод (3) измерения эффекта синергии от объединения организаций к измерению эффекта синергии в ГиИМАС:

$$C_{\text{ГиИМАС}} = \text{ККР}_2 - \text{ККР}_1,$$

где $C_{\text{ГиИМАС}}$ — количественная оценка синергетического эффекта в ГиИМАС; ККР_1 — критерий качества лучшего решения задачи из всех найденных агентами, входящими в ГиИМАС, без взаимодействия, индивидуально; ККР_2 — критерий качества лучшего решения задачи, полученного агентами коллективно. При этом нужно учитывать, что коллективное решение сложной задачи в ГиИМАС может представлять собой итерационный процесс, на каждой итерации которого каждый агент заново решает свою подзадачу с учетом решений других агентов. В этом

Таблица 1 Методы измерения эффекта синергии от объединения организаций

Метод	Достоинства	Недостатки
Экспертных оценок	Относительная точность и простота количественной оценки уровня синергетического эффекта	Субъективный характер; требует выявления факторов, обуславливающих синергетический эффект; сложно полностью автоматизировать
Затратный	Основан на доступной бухгалтерской информации; легко поддается автоматизации	Не учитывает потенциал предприятий по генерированию дохода; стоимость нематериальных активов может расходиться у продавца и покупателя; требуется система коэффициентов, характеризующих степень взаимодействия участников кластера
Рыночных сравнений	Основан на доступной финансовой информации о стоимости ценных бумаг; широко распространен в странах с хорошо развитым фондовым рынком; легко автоматизируется	Изменение стоимости кластера может быть обусловлено другими факторами, включая недооценку фирм или изменения в управлении ими; требуется система коэффициентов степени взаимодействия участников кластера
Доходный	Высокая точность; учитывает диффузию инноваций внутри кластера, развитие родственных и поддерживающих компаний, стимулирование конкуренции между компаниями; легко поддается автоматизации	Требуется система коэффициентов степени взаимодействия участников кластера

случае при определении KKP_1 должно быть проведено столько же итераций, на каждой из которых агенты заново решают свои подзадачи, не зная решений других агентов.

4 Моделирование эффекта синергии в гибридных интеллектуальных многоагентных системах

Моделирование малого коллектива экспертов, решающего сложные задачи, и возникающего в нем эффекта синергии предлагается реализовать с использованием ГиИМАС со структурой, представленной в [20]. ГиИМАС — гибридные интеллектуальные системы (ГиИС), реализующие многоагентный подход [20]. Элементы таких ГиИС реализуются в виде агентов, обладающих свойством автономности [21]. Как и многоагентные системы (МАС), они моделируют взаимодействия автономных агентов между собой и с внешней средой, в результате которых архитектура системы может динамически перестраиваться в соответствии

с конкретными функциями агентов и установившимися отношениями между ними. В результате ГиИМАС сочетают в себе положительные стороны ГиИС и МАС: благодаря интеграции нескольких методов искусственного интеллекта они релевантны задачам с высокой сложностью моделирования [20], а за счет имитации взаимодействия экспертов и коллективных процессов они способны менять свою архитектуру для достижения синергетического эффекта.

Для оценки влияния эффекта синергии на качество решений ГиИМАС проведены серии экспериментов, в которых требовалось решить сложную транспортно-логистическую задачу (СТЛЗ), т. е. найти для нескольких транспортных средств совокупность маршрутов, оптимальную по четырем критериям: суммарная стоимость; общая длительность поездок для всех транспортных средств; вероятность опоздания хотя бы к одному клиенту; надежность (мерой надежности будем считать математическое ожидание увеличения стоимости совокупности маршрутов). Учитывались такие стохастические факторы, как вероятность дорожных пробок, опоздания к клиенту, потери от боя груза и др.

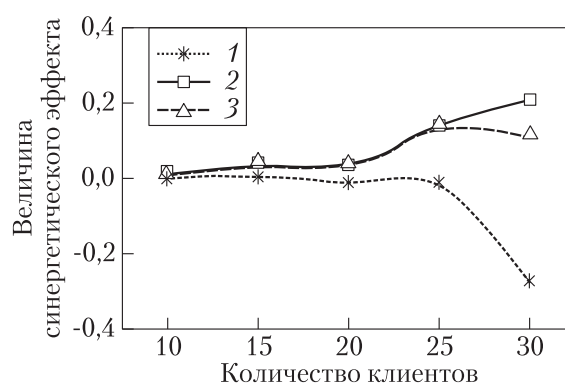
Исходные данные: (1) запросы клиентов на доставку грузов: наименование, количество товара, временной интервал его доставки; (2) сведения о дорогах к клиентам: протяженность, загруженность, качество; (3) паспортные данные транспортных средств: расход горюче-смазочных материалов, грузоподъемность и т. п.; (4) сведения о графиках работы и заработной плате персонала: водителей и грузчиков; (5) информация о грузе: вес, габариты, хрупкость и т. п.

Выходные данные: совокупность маршрутов доставки грузов (по одному на транспортное средство) и ее параметры (стоимость, длительность, надежность и вероятность опоздания, сводный критерий качества маршрута). Для тестирования использованы задачи из табл. 2.

Исследовались три архитектуры ГиИМАС: с нейтральными, сотрудничающими и конкурирующими агентами. В ГиИМАС с нейтральными агентами каждый из четырех агентов поиска решения минимизирует значение «своего» критерия оценки решения. В ГиИМАС с сотрудничающими агентами все 4 агента-поисковика минимизируют все 4 критерия оценки решения. В ГиИМАС с конкурирующими агентами один агент минимизирует стоимость и макси-

Таблица 2 Количественные параметры тестируемых задач

Задача	Число клиентов	Число дорог	Число водителей	Число грузчиков	Число автомобилей
СТЛЗ_10	10	75	3	3	3
СТЛЗ_15	15	240	5	5	5
СТЛЗ_20	20	420	5	5	5
СТЛЗ_25	25	650	9	9	9
СТЛЗ_30	30	377	6	6	6



Архитектура ГиИМАС	Количество клиентов				
	10	15	20	25	30
1 — конкуренция	0,0009	0,0107	-0,0062	-0,0114	-0,2683
2 — нейтралитет	0,023	0,0379	0,0886	0,1451	0,2134
3 — сотрудничество	0,0222	0,0377	0,0384	0,139	0,1222

Величина синергетического эффекта в различных типах архитектуры ГиИМАС

мизирует длительность, второй — максимизирует стоимость и минимизирует длительность, третий — минимизирует вероятность опоздания и максимизирует надежность, а четвертый — максимизирует вероятность опоздания и минимизирует надежность.

Качество тестовых решений оценивалось по объективным показателям и субъективно экспертами. Для 5 задач и каждой архитектуры ГиИМАС проведено по 100 вычислительных экспериментов. Построена графическая зависимость величины эффекта синергии от числа клиентов в задаче (см. рисунок).

Как следует из рисунка, в большинстве случаев в любой архитектуре ГиИМАС в какой-то степени присутствует синергия. Однако заметной она становится на задачах с высокой комбинаторной сложностью: СТЛЗ_20, СТЛЗ_25 и СТЛЗ_30. Именно для таких задач особенно важна архитектура ГиИМАС. На рисунке видно, что для задач с более чем 20 клиентами ГиИМАС с конкурирующими агентами демонстрирует эффект отрицательной синергии (дисергии), когда коллективное решение не лучше решений индивидуальных агентов, что согласуется с исследованиями в [12]. Очевидно, этот эффект обусловлен невозможностью конкурирующих агентов «договориться» на задачах с высокой комбинаторной сложностью. Таким образом, показано, что при правильной организации взаимодействия в ГиИМАС возникает эффект синергии, что повышает качество принимаемых решений по сравнению с ГиИМАС, в которой он не моделируется.

5 Заключение

В статье рассмотрены существующие представления о причинах возникновения эффекта синергии при управлении сложными социально-техническими системами. Особое внимание уделено рассмотрению явления в малых коллективах экспертов, так как данные системы — надежно зарекомендовавший себя инструмент решения сложных задач. Научив компьютер имитировать их работу, явления и процессы, происходящие в них, можно научить его решать сложные задачи автоматизированным способом.

Выполнен анализ подходов к моделированию и измерению эффекта синергии и программная реализация алгоритма моделирования эффекта синергии с использованием ГиИМАС. Проведена серия вычислительных экспериментов, подтверждающая возможность возникновения эффекта синергии в ГиИМАС при правильной организации взаимодействия агентов. Предложенный метод измерения эффекта синергии в ГиИМАС может быть использован как элемент инструментария для идентификации и визуализации текущей ситуации принятия решений.

Литература

1. Kaner S., Lind L., Toldi C., Fisk S., Berger D. The facilitator's guide to participatory decision-making. — San Francisco, CA: Jossey-Bass, 2011. 368 p.
2. Кириков И. А., Колесников А. В., Румовская С. Б., Барзенков А. В., Петренко Е. В. Концептуальная модель виртуальных гетерогенных коллективов для поддержки принятия групповых решений // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. Вып. 3. С. 93–105.
3. Жилин Д. М. Теория систем. — М.: УРСС, 2004. 183 с.
4. Логвинов С. А., Смирнов В. В. Позитивная синергетика при достижении стратегических целей организаций // Экономические науки, 2010. № 72. С. 106–110.
5. Prigogine I., Stengers I. Order out of chaos. — New York, NY, USA: Bantam Books, 1984. 349 p.
6. Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Основания синергетики. Синергетическое мировоззрение. — М.: КомКнига, 2005. 240 с.
7. Haken H. Synergetics. An introduction. — Berlin – Heidelberg – New York: Springer-Verlag, 1977. 325 p.
8. Ulam S. M. A collection of mathematical problems. — New York, NY, USA: Interscience, 1960. 163 p.
9. Ansoff I. H. Strategic management. — New York, NY, USA: Wiley, 1979. 236 p.
10. Hill G. W. Group versus individual performance: Are $N + 1$ heads better than one? // Psychol. Bull., 1982. Vol. 91. No. 3. P. 517–539.
11. Collins B. E., Guetzkow H. A social psychology of group processes for decision-making. — New York, NY, USA: Wiley, 1964. 264 p.
12. Johnson D. W., Maruyama G., Johnson R., Nelson D., Skon L. Effects of cooperative, competitive, and individualistic goal structure on achievement: A meta-analysis // Psychol. Bull., 1981. Vol. 89. No. 1. P. 47–62.

13. *Steiner I. D.* Group process and productivity. — New York, NY, USA: Academic Press, 1972. 204 p.
14. *Hackman J. R., Morris C. G.* Group tasks, group interaction process, and group performance effectiveness: A review and proposed integration // *Adv. Exp. Soc. Psychol.*, 1975. Vol. 8. P. 45–99.
15. *Тарасов В. Б.* Методология агентно-ориентированного формирования синергетических организаций // *Реинжиниринг бизнес-процессов на основе современных информационных технологий. Системы управления знаниями: Сб. докл. 9-й науч.-практич. конф.* — М.: МЭСИ, 2006. С. 74–82.
16. *Авдошин С. М., Тарасов В. Б.* Синергетические организации в экономике XXI века // *Известия АИН им. А. М. Прохорова*, 2006. Т. 17. С. 155–163.
17. *Тарасов В. Б.* Новые стратегии реорганизации и автоматизации предприятий: на пути к интеллектуальным предприятиям // *Новости искусственного интеллекта*, 1996. № 4. С. 40–84.
18. *Тарасов В. Б.* Интеллектуальные предприятия и управление знаниями: на пути к синергетическому искусственному интеллекту // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. IV Междунар. конф.* — Самара: Самарский научный центр РАН, 2002. С. 166–176.
19. *Авдошина С. Г.* Количественные методы оценки синергетического эффекта инновационного кластера. http://www.uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=1147.
20. *Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В., Румовская С. Б., Доманицкий А. А.* Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / Под ред. А. В. Колесникова. — М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с.
21. *Тарасов В. Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.

Поступила в редакцию 15.08.17

METHOD FOR MEASURING SYNERGY EFFECT IN HYBRID INTELLIGENT MULTIAGENT SYSTEMS

I. Kirikov¹, A. Kolesnikov^{1,2}, S. Listopad¹, and S. Rumovskaya¹

¹Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str, Kaliningrad 236000, Russian Federation

²Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation

Abstract: Complex tasks of management and decision-making in social and technical systems require the involvement of the collective intelligence such as expert roundtables, hybrid intellectual multiagent systems as models of discussion

in teams, or virtual heterogeneous teams consisting of real and “artificial” experts (avatars). Solving complex problems with collective intelligence is a multistage process of negotiations and exchange of solutions. To organize it effectively, a tool is needed reflecting the state of the collective process of solving complex problems. The article considers existing methods and models for estimating the synergy effect and suggests a method for its evaluation in hybrid intelligent multiagent systems.

Keywords: management; decision-making; expert team; hybrid intelligent multiagent system; synergy effect; method for measuring synergy

DOI: 10.14357/08696527170309

References

1. Kaner, S., L. Lind, C. Toldi, S. Fisk, and D. Berger. 2011. *The facilitator's guide to participatory decision-making*. San Francisco, CA: Jossey-Bass. 368 p.
2. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, S. B. Rumovskaya, A. V. Barzenkov, and E. V. Petrenko. 2016. Kontseptual'naya model' virtual'nykh geterogennykh kollektivov dlya podderzhki prinyatiya gruppovykh resheniy [Conceptual model of virtual heterogeneous collective for supporting group decision-making]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):93–105.
3. Zhilin, D. M. 2004. *Teoriya sistem* [Systems theory]. Moscow: URSS. 183 p.
4. Logvinov, S. A., and V. V. Smirnov. 2010. Pozitivnaya sinergetika pri dostizhenii strategicheskikh tseley organizatsiy [Positive synergies in achieving strategic goals of organizations]. *Ekonomicheskie nauki* [Economic Sciences] 72:106–110.
5. Prigogine, I., and I. Stengers. 1984. *Order out of chaos*. New York, NY: Bantam Books. 349 p.
6. Knyazeva, E. N., and S. P. Kurdyumov. 2005. *Osnovaniya sinergetiki. Sinergeticheskoe mirovidenie* [Foundations of synergetics. Synergistic worldview]. Moscow: KomKniga. 240 p.
7. Haken, H. 1977. *Synergetics. An introduction*. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag. 325 p.
8. Ulam, S. M. 1960. *A collection of mathematical problems*. New York, NY: Interscience. 163 p.
9. Ansoff, I. H. 1979. *Strategic management*. New York, NY: Wiley. 236 p.
10. Hill, G. W. 1982. Group versus individual performance: Are $N + 1$ heads better than one? *Psychol. Bull.* 91(3):517–539.
11. Collins, B. E., and H. Guetzkow. 1964. *A social psychology of group processes for decision-making*. New York, NY: Wiley. 264 p.
12. Johnson, D. W., G. Maruyama, R. Johnson, D. Nelson, and L. Skon. 1981. Effects of cooperative, competitive, and individualistic goal structure on achievement: A meta-analysis. *Psychol. Bull.* 89:47–62.
13. Steiner, I. D. 1972. *Group process and productivity*. New York, NY: Academic Press. 204 p.

14. Hackman, J. R., and C. G. Morris. 1975. Group tasks, group interaction process, and group performance effectiveness: A review and proposed integration. *Adv. Exp. Soc. Psychol.* 8:45–99.
15. Tarasov, V. B. 2006. Metodologiya agentno-orientirovannogo formirovaniya sinergeticheskikh organizatsiy [Methodology of agent-oriented formation of synergistic organizations]. *Reinzhiniring biznes-protsessov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy. Sistemy upravleniya znaniyami. Sb. dokl. 9-y nauchn.-praktich. konf.* [Reengineering of business processes on the basis of modern information technologies. Knowledge management systems. Collection of Reports of the 9th Scientific-Practical Conference]. Moscow: MESI. 74–82.
16. Avdoshin, S. M., and V. B. Tarasov. 2006. Sinergeticheskie organizatsii v ekonomike XXI veka [Synergetic organizations in the economy of the 21st century]. *Izvestiya AIN im. A. M. Prokhorova* [News of A. M. Prokhorov Academy of Engineering Sciences] 17:155–163.
17. Tarasov, V. B. 1996. Novye strategii reorganizatsii i avtomatizatsii predpriyatiy: na puti k intellektual'nym predpriyatiyam [New strategies for the reorganization and automation of enterprises: On the way to intelligent enterprises]. *Novosti iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence News] 4:40–84.
18. Tarasov, V. B. 2002. Intellektual'nye predpriyatiya i upravlenie znaniyami: na puti k sinergeticheskomu iskusstvennomu intellektu [Intelligent enterprises and knowledge management: on the way to synergetic artificial intelligence]. *Problems of Control and Modeling in Complex Systems: 6th Conference (International) Proceedings*. Samara: Samara Science Center of RAS. 166–176.
19. Avdonina, S. G. Kolichestvennye metody otsenki sinergeticheskogo effekta innovatsionnogo klastera [Quantitative methods for assessing the synergistic effect of an innovative cluster]. Available at: <http://www.uecs.ru/index.php?option=com-flexicontent&view=items&id=1147> (accessed August 3, 2017).
20. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and A. A. Domanitskiy. 2011. *Reshenie slozhnykh zadach kommiyoyazhera metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh sistem* [Complex travelling salesman problems solving by the methods of the functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 295 p.
21. Tarasov, V. B. 2002. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektualnym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multiagent systems to intelligent organizations: Philosophy, psychology, and informatics]. Moscow: Editorial URSS. 352 p.

Received August 15, 2017

Contributors

Kirikov Igor A. (b. 1955) — Candidate of Sciences in technology; director, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str, Kaliningrad 236000, Russian Federation; baltbipiran@mail.ru

Kolesnikov Alexander V. (b. 1948) — Doctor of Sciences in technology; professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad

236041, Russian Federation; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str, Kaliningrad 236000, Russian Federation; avkolesnikov@yandex.ru

Listopad Sergey V. (b. 1984) — Candidate of Sciences in technology; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str, Kaliningrad 236000, Russian Federation; ser-list-post@yandex.ru

Rumovskaya Sophiya B. (b. 1985) — programmer I, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str, Kaliningrad 236000, Russian Federation; sophiyabr@gmail.com

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ГЕТЕРОГЕННЫМ ВИЗУАЛЬНЫМ ПОЛЕМ*

А. В. Колесников¹, С. В. Листопад²

Аннотация: Предлагается алгоритм синтеза нового класса интеллектуальных систем — гибридных интеллектуальных систем (ГиИС) с гетерогенным визуальным полем (ГВП), моделирующих интеграцию коллективных символично-логических и визуально-образных рассуждений. Для реализации применяется формализованная модель визуальных языков, основанная на понятии семиотической системы по Д. А. Поспелову, а также многослойная модель языков профессиональной деятельности А. В. Колесникова. Гибридные интеллектуальные системы с ГВП смогут управлять имитационным процессом и в зависимости от неопределенности проблемной ситуации попеременно приводить в действие символично-логические или визуально-образные механизмы рассуждений, имитируя «скачки» в гибридном пространстве состояний, отображая инсайт (озарение) во время коллективной работы экспертов.

Ключевые слова: гибридная интеллектуальная система; гетерогенное визуальное поле; визуальные рассуждения

DOI: 10.14357/08696527170310

1 Введение

Традиционно для преодоления неоднородности сложных задач применяются методы системного анализа и привлекаются коллективы экспертов со специфическими для каждого специалиста моделями внешнего мира, обуславливающими его понимание и решение задачи. Взаимодействуя в процессе решения задачи, эксперты не только предлагают свои частные решения, но и обмениваются мнениями, опытом, знаниями на профессиональных вербально-символьных и визуально-образных языках. Визуализация качественно меняет субъект управления, позволяя ему с одного взгляда распознать проблемную ситуацию и «увидеть ее решение» без логических умозаключений. В то же время подготовка данных для

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-07-00271а).

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта; Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, avkolesnikov@yandex.ru

²Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ser-list-post@yandex.ru

визуализации и детальная проработка найденного решения невозможна без применения символично-логических рассуждений. Такая способность сочетать символично-логические и визуально-образные рассуждения во многом и обеспечивает релевантность коллектива практическим сложным задачам с их динамической структурой и неоднородной предметной областью.

В настоящей работе предлагается новый класс интеллектуальных информационных систем — ГиИС с ГВП, имитирующих сотрудничество, относительность и дополнительность коллективного интеллекта для поиска решений на символических и визуальных языках. Гибридные интеллектуальные системы анонсированы Л. Медскером (L. Medsker) в 1994–1995 гг. Знания в области синергетического и гибридного искусственного интеллекта изучены, обобщены и опубликованы в работах А. Н. Борисова, А. В. Гаврилова, В. Ф. Пономарева, А. В. Колесникова, Д. А. Поспелова, В. Н. Вагина, А. П. Еремеева, Г. В. Рыбиной, В. Б. Тарасова, Н. Г. Ярушкиной, С. Гунэтилэйка, С. Кхеббала. Существенный недостаток ГиИС на текущем этапе их развития — моделирование преимущественно логического мышления, обеспечивающего возможность рассуждать в рамках абстрактных цепочек символов, с которыми связаны некоторые семантические и прагматические представления. Ключевое отличие предлагаемых ГиИС — способность динамически конструировать метод решения сложных задач над ГВП, бесшовно комбинируя символично-логические и визуально-образные методы рассуждений.

2 Модель гетерогенного визуального поля

Появление модели ГВП [1] обусловлено тем, что универсального визуального языка для описания любой предметной области не существует. Ввиду узкой специализации управленцев-экспертов по профессиональным нишам, информация в коллективе, принимающем решения, представляется на широком спектре языков профессиональной деятельности с относительно независимыми задачами, лексикой, знаниями, принципами [2]. Стратификация по нишам при разработке ГиИС редуцирует сложность задач до простых элементов — подзадач в локальных подобластях мира управления — профессиональных нишах.

Формально ГВП может быть представлено в виде:

$$GVF = \langle MVL, COR^{VL} \rangle. \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} MVL &= \{mvl_1, \dots, mvl_{N_{MVL}}\}, \\ COR^{VL} &= \langle G^{VT}, G^{VS}, G^{VA}, G^{VP}, G^{v\tau}, G^{v\sigma}, G^{v\alpha}, G^{v\pi} \rangle, \\ G_{ij}^{VT} &: VT_i \rightarrow VT_j, \quad G_{ij}^{VT} \subseteq G^{VT}, \\ G_{ij}^{VS} &: VS_i \rightarrow VS_j, \quad G_{ij}^{VS} \subseteq G^{VS}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_{ij}^{VA} &: VA_i \rightarrow VA_j, \quad G_{ij}^{VA} \subseteq G^{VA}, \\
 G_{ij}^{VP} &: VP_i \rightarrow VP_j, \quad G_{ij}^{VP} \subseteq G^{VP}, \\
 G_{ij}^{v\tau} &: v\tau_i \rightarrow v\tau_j, \quad G_{ij}^{v\tau} \subseteq G^{v\tau}, \\
 G_{ij}^{v\sigma} &: v\sigma_i \rightarrow v\sigma_j, \quad G_{ij}^{v\sigma} \subseteq G^{v\sigma}, \\
 G_{ij}^{v\alpha} &: v\alpha_i \rightarrow v\alpha_j, \quad G_{ij}^{v\alpha} \subseteq G^{v\alpha}, \\
 G_{ij}^{v\pi} &: v\pi_i \rightarrow v\pi_j, \quad G_{ij}^{v\pi} \subseteq G^{v\pi}, \quad i, j \in [1, N_{MVL}], \quad i \neq j,
 \end{aligned}$$

где MVL — множество визуальных метаязыков $mv1_i \in MVL$ в ГБП, построенных в соответствии с (2); COR^{VL} — множество соответствий $G^{VT}, G^{VS}, G^{VA}, G^{VP}, G^{v\tau}, G^{v\sigma}, G^{v\alpha}, G^{v\pi}$ элементов визуальных языков, входящих в метаязыки $mv1_i \in MVL$; VT — множество базовых символов; VS — множество синтаксических правил; VA — множество аксиом-знаний о предметной области, семантических правил, задающих соответствие между визуальным символом и соответствующим концептом; VP — множество прагматических правил; $v\tau, v\sigma, v\alpha$ и $v\pi$ — правила изменения множеств VT, VS, VA и VP соответственно [1]; N_{MVL} — число визуальных метаязыков (областей неоднородности) в ГБП.

Визуальный метаязык из (1) может быть представлен выражением [1]:

$$mv1 = \langle v1^1, v1^2, v1^3, v1^4, v1^5, v1^6, v1^7, v1^8, VLR \rangle, \quad (2)$$

где $v1^k$ — визуальные языки [1], построенные в соответствии с (3)–(11); $k \in \mathbb{N}$, $k \in [1, 8]$ — уровень визуального языка; VLR — множество отношений между элементами языков $v1^k$. В соответствии с [3] выделено восемь уровней визуальных языков для реализации автоматизированных рассуждений в интеллектуальных системах:

- (1) концептуального и визуального базиса $v1^1$;
- (2) ресурсов, действий и свойств $v1^2$;
- (3) иерархий ресурсов, действий, свойств $v1^3$;
- (4) пространственных и производственных структур $v1^4$;
- (5) состояний, ситуаций и событий $v1^5$;
- (6) задач и проблем $v1^6$;
- (7) моделей рассуждений экспертов $v1^7$;
- (8) интегрированных моделей рассуждений коллективного интеллекта $v1^8$.

Визуальный язык формализованно может быть записан выражением [1] как обобщение работ по имитации рассуждений на визуальных образах [4–10]:

$$vl = \langle VT, VS, VA, VP, v\tau, v\sigma, v\alpha, v\tau \rangle; \quad (3)$$

$$VT = \langle P, D, VR \rangle; \quad (4)$$

$$VS = \langle VT, VN, PRU \rangle; \quad (5)$$

$$VA = \langle DO, G^{\text{RES}}, G^{\text{PR}}, G^R \rangle, \quad (6)$$

где

$$DO = \langle \text{RES}, \text{PR}, R \rangle, G^{\text{RES}} : \text{RES} \rightarrow P,$$

$$G^{\text{PR}} : \text{PR} \rightarrow D, G^R : R \rightarrow \text{VR};$$

$$VP = \{ \langle \text{AG}, \text{act}, M, W \rangle \}; \quad (7)$$

$$v\tau = \langle \Delta P, \Delta D, \Delta \text{VR} \rangle; \quad (8)$$

$$v\sigma = \langle v\tau, \Delta \text{VN}, \Delta \text{PRU} \rangle; \quad (9)$$

$$v\alpha = \langle \Delta \text{DO}, G^{\Delta \text{RES}}, G^{\Delta \text{PR}}, G^{\Delta R} \rangle, \quad (10)$$

где

$$\Delta \text{DO} = \langle \Delta \text{RES}, \Delta \text{PR}, \Delta R \rangle, G^{\Delta \text{RES}} : \Delta \text{RES} \rightarrow \Delta P,$$

$$G^{\Delta \text{PR}} : \Delta \text{PR} \rightarrow \Delta D, G^{\Delta R} : \Delta R \rightarrow \Delta \text{VR};$$

$$v\pi = \{ \langle \Delta \text{AG}, \Delta \text{act}, \Delta M, \Delta W \rangle \}. \quad (11)$$

Здесь помимо ранее введенных обозначений P — множество визуальных примитивов; D — множество визуальных измерений, характеризующих визуальные примитивы; VR^n — множество визуальных отношений между одним и более примитивами [6]; VN — словарь нетерминальных символов; PRU — множество продукционных правил; RES , PR и R — множества ресурсов, свойств и отношений соответственно; AG — множество носителей языка (экспертов, элементов, агентов), которым адресована норма поведения (запреты и ограничения, накладываемые сообществом на отдельного носителя); $\text{act} \in \text{ACT}$ — действие, определенное на множестве действий ACT и являющееся объектом нормативной регуляции (содержание нормы); M — множество систем модальностей, связанных с действием, например система норм, выраженных деонтическими модальностями: $M_N = \{O, P, B, Z\}$, где O — «обязательно», P — «разрешено», B — «безразлично», Z — «запрещено»; W — множество миров, в которых применима норма [11]; ΔP , ΔD , ΔVR , ΔVN , ΔPRU , ΔRES , ΔPR , ΔR , ΔAG , ΔM и ΔW — множества допустимых изменений множеств P , D , VR , VN , PRU , RES , PR , R , AG , M и W соответственно; Δact — множество допустимых

изменений содержания нормы акт. Соответствия G^{RES} , G^{PR} и G^R обеспечивают взаимосвязь визуальных примитивов, измерений и отношений с концептами, представленными в символьном виде. Таким образом, модели, построенные над ГВП, релевантнее структуре интеллекта по Г. Гарднеру, могут при необходимости переходить с символьных рассуждений на визуальные и обратно или сменять друг друга, имитируя «скачки» в гибридном пространстве состояний, соответствующие инсайту, озарению в коллективах экспертов, что развивает предложенный в [2] подход к синтезу ГиИС над ГВП.

Рассмотрим отношения между языками разных уровней на примере их множеств синтаксических правил. В первом слое расположены словари понятий и отношений — концептуально-визуальный базис языка. Язык первого уровня vl^1 использует эвристические правила PRU^1 для построения из P^1 , D^1 и VR^1 знаков производных (составных) отношений $\text{vr}^{n1} \in \text{VR}^{n1} \subseteq \text{VT}^1$:

$$\text{vl}^1 (P^1, D^1, \text{VR}^1, \text{PRU}^1) = \{\text{vr}^{n1}\}.$$

В языке второго уровня vl^2 эвристики PRU^2 используются, чтобы сформировать графические образы ресурсов $\text{res}^2 \in \text{RES}^2 \subseteq \text{VT}^2$, действий $\text{act}^2 \in \text{ACT}^2 \subseteq \text{VT}^2$ и свойств $\text{pr}^2 \in \text{PR}^2 \subseteq \text{VT}^2$ без учета их иерархичности с помощью отношений определения $\text{VR}_1^{n1} \subseteq \text{VR}^{n1}$:

$$\text{vl}^2 (P^1, D^1, \text{VR}_1^{n1}, \text{PRU}^2) = \text{RES}^2 \cup \text{PR}^2 \cup \text{ACT}^2.$$

На третьем уровне отношениями включения $\text{VR}_5^{n,1} \subseteq \text{VR}^{n1}$ и эвристиками PRU^3 формализованы иерархии ресурсов $\text{res}^{n3} \in \text{RES}^{n3} \subseteq \text{VT}^3$, действий $\text{act}^{n3} \in \text{ACT}^{n3} \subseteq \text{VT}^3$ и свойств $\text{pr}^{n3} \in \text{PR}^{n3} \subseteq \text{VT}^3$:

$$\text{vl}^3 (P^1, D^1, \text{RES}^2, \text{PR}^2, \text{ACT}^2, \text{VR}_5^{n1}, \text{PRU}^3) = \text{RES}^{n3} \cup \text{PR}^{n3} \cup \text{ACT}^{n3}.$$

Четвертый уровень на основе знаков предыдущих уровней, временных $\text{VR}_3^{n1} \subseteq \text{VR}^{n1}$, пространственных $\text{VR}_4^{n1} \subseteq \text{VR}^{n1}$, причинно-следственных $\text{VR}_6^{n1} \subseteq \text{VR}^{n1}$ отношений, а также эвристики формализует пространственные $\text{str}_1^4 \in \text{STR}_1^4 \subseteq \text{VT}^4$, операционально-технологические $\text{str}_3^4 \in \text{STR}_3^4 \subseteq \text{VT}^4$ структуры:

$$\begin{aligned} \text{vl}^4 (P^1, D^1, \text{RES}^{n3}, \text{PR}^{n3}, \text{ACT}^{n3}, \text{VR}_3^{n1}, \text{VR}_4^{n1}, \text{VR}_6^{n1}, \text{PRU}^4) = \\ = \text{STR}_1^4 \cup \text{STR}_3^4. \end{aligned}$$

На пятом уровне эвристиками PRU^5 формализуют знаки-ситуации $\text{sit}^5 \in \text{SIT}^5 \subseteq \text{VT}^5$ и знаки-состояния $\text{st}^5 \in \text{ST}^5 \subseteq \text{VT}^5$:

$$\text{vl}^5 (\text{STR}_1^4, \text{STR}_3^4, \text{PRU}^5) = \text{SIT}^5 \cup \text{ST}^5.$$

На шестом уровне на основе знаков предыдущих уровней и эвристик PRU^6 специфицируются знаки однородных $\text{prb}^{h6} \in \text{PRB}^{h6} \subseteq \text{VT}^6$ и неоднородных $\text{prb}^{u6} \in \text{PRB}^{u6} \subseteq \text{VT}^6$ задач:

$$\text{vl}^6 (P^1, D^1, \text{RES}^{n3}, \text{PR}^{n3}, \text{ACT}^{n3}, \text{VR}^{n1}, \text{ST}^5, \text{PRU}^6) = \text{PRB}^{h6} \cup \text{PRB}^{u6}.$$

На седьмом уровне эвристиками PRU^7 формируются знаки автономных моделей $\text{mod}^{a7} \in \text{MOD}^{a7} \subseteq \text{VT}^7$, алгоритмов $\text{alg}^7 \in \text{ALG}^{a7} \subseteq \text{VT}^7$, программ $\text{prg}^{a7} \in \text{PRG}^{a7} \subseteq \text{VT}^7$ и методов решения задач $\text{met}^{a7} \in \text{MET}^{a7} \subseteq \text{VT}^7$, имитирующих рассуждения отдельно взятого эксперта:

$$\begin{aligned} \text{vl}^7 (P^1, D^1, \text{RES}^{n3}, \text{ACT}^{n3}, \text{VR}^{n1}, \text{PRU}^7) = \\ = \text{MOD}^{a7} \cup \text{ALG}^{a7} \cup \text{PRG}^{a7} \cup \text{MET}^{a7}. \end{aligned}$$

На восьмом уровне на основе знаков предыдущих уровней и эвристик PRU^8 специфицируются знаки интегрированных методов решения задач $\text{met}^{u8} \in \text{MET}^{u8} \subseteq \text{VT}^8$, имитирующих рассуждения коллектива экспертов:

$$\begin{aligned} \text{vl}^8 (P^1, D^1, \text{RES}^{n3}, \text{PR}^{n3}, \text{ACT}^{n3}, \text{VR}^{n1}, \text{ST}^5, \text{SIT}^5, \text{PRB}^{h6}, \text{PRB}^{u6}, \\ \text{MET}^{a7}, \text{PRU}^8) = \text{MAT}^{u8}. \end{aligned}$$

Такая многослойная модель визуального языка — инструмент сложного описания предметной области на разных уровнях обобщенности, формирующий его из набора более простых моделей.

Рассмотрим пример построения ГВП при реализации одной из основных процедур на этапе синтеза функциональных ГиИС — конструирование метода решения сложной неоднородной задачи. Данная процедура необходима, так как для решения неоднородной задачи не существует автономного метода, заведомо известного или выбираемого из множества существующих [2]. Для решения каждой сложной задачи в соответствующий момент времени должен конструироваться новый интегрированный метод решения. В следующий момент времени метод, сконструированный ранее, уже может быть не релевантен состоянию объекта управления в условиях изменяющихся воздействий внешней среды.

Такой метод строится на языке vl^8 , результате интерпретации ГиИС, конструируемой связыванием отношениями интеграции $\text{res}^{\text{res}}\text{VR}_1^{n6}$ элементов — автономных моделей из ГВП (1), построенных на языке vl^7 и сопоставленных однородным подзадачам сложной задачи, знаки которых построены на языке шестого уровня vl^6 [2]. Для этого разработчик выполняет редукцию и строит множество декомпозиций $\widehat{\text{PRB}}^{u6}$ задачи prb^{u6} .

Пусть в составе неоднородной prb^{u6} -задачи выделены подзадача координации [12], решаемая методами экспертных систем (Lg), и семь однородных подзадач prb_1^{h6} – prb_7^{h6} , описываемых на различных метаязыках и решаемых методами различных классов: аналитические вычисления (An), нейровычисления (Ne), нечеткие вычисления (Fu), рассуждения на основе опыта (Ex), эволюционные вычисления (Ge), статистические вычисления (St), визуальные рассуждения (Vi). Однородные подзадачи с исходной неоднородной задачей связаны отношениями включения $\text{prb}^{\text{prb}}\text{VR}_2^{n6}$, показанными на рис. 1 точечными стрелками, с координационной подзадачей — отношениями координации $\text{prb}^{\text{prb}}\text{VR}_k^{n6}$, показанными пунктирными стрелками, а между собой — отношениями декомпозиции $\text{prb}^{\text{prb}}\text{VR}_3^{n6}$, показанными жирными сплошными стрелками. В таком случае ГВП состоит из восьми метаязыков, т. е. $N_{\text{MVL}} = 8$, которые показаны на рис. 1 прямоугольниками с различной штриховкой на нижнем слое — языке задач vl^6 . Когда множество декомпозиций PRB^{u6} задачи prb^{u6} построено, разрабатываются и (или) используются однородные модели $\{\text{mod}_i^{a7}\}$ из различных визуальных метаязыков mvl_i и выполняются другие этапы жизненного цикла разработки ГиИС в соответствии с проблемно-структурной методологией [2].

Пусть подзадаче prb_1^h релевантна модель $\text{mod}_3^{a\text{An}}$ с использованием аналитического метода $\text{met}_3^{a\text{An}}$, подзадаче prb_2^h — модели $\text{mod}_1^{a\text{St}}$, $\text{mod}_2^{a\text{St}}$, обе с использованием двух разных статистических методов $\text{met}_1^{a\text{St}}$, $\text{met}_2^{a\text{St}}$, подзадаче prb_3^h — модели $\text{mod}_1^{a\text{Ne}}$, $\text{mod}_2^{a\text{Ne}}$, $\text{mod}_3^{a\text{Ne}}$ с использованием трех разных методов нейровычислений $\text{met}_1^{a\text{Ne}}$, $\text{met}_2^{a\text{Ne}}$, $\text{met}_3^{a\text{Ne}}$, а подзадачам prb_4^h , prb_5^h , prb_6^h , prb_7^h , prb_k^h релевантны модели $\text{mod}_1^{a\text{Fu}}$, $\text{mod}_1^{a\text{Ex}}$, $\text{mod}_1^{a\text{Ge}}$, $\text{mod}_1^{a\text{Vi}}$, $\text{mod}_k^{a\text{Lg}}$. Отношения релевантности моделей подзадаче $\text{prb}^{\text{mod}}\text{VLR}_1^{n7}$ показаны штрихпунктирными линиями на рис. 1 между слоями vl^6 и vl^7 . Модели связаны между собой отношениями интеграции $\text{res}^{\text{res}}\text{VR}_1^{n6}$, которые определяются декомпозицией сложной задачи и таблицей гибридных стратегий [2]. В случае если разрабатываемая ГиИС предназначена для решения единственной неоднородной задачи и не учитывает ее взаимосвязи с другими сложными задачами, на уровне vl^8 (на рис. 1 не показан) конструируется единственный знак met^{u8} , представляющий интегрированный метод, с которым отношениями включения связаны автономные модели-элементы $\{\text{mod}_i^{a7}\}$.

Таким образом, задаче prb^{u6} соответствует ГВП GVF размерности N_{MVL} , в котором сконструированы непустые, может быть и одноэлементные, подмножества $\{\text{mod}_i^{a7}\}$ знаков автономных моделей, сопоставленные подзадачам $\text{prb}_i^{h6} \in \text{PRB}^{h6}$. В случае если все подмножества $\{\text{mod}_i^{a7}\}$ — одноэлементные, неопределенности с выбором модели не возникает и ГиИС может быть сразу инициализирована. Однако практика построения ГиИС показывает, что такая ситуация встречается нечасто и синтез ГиИС требует дополнительных действий разработчика.

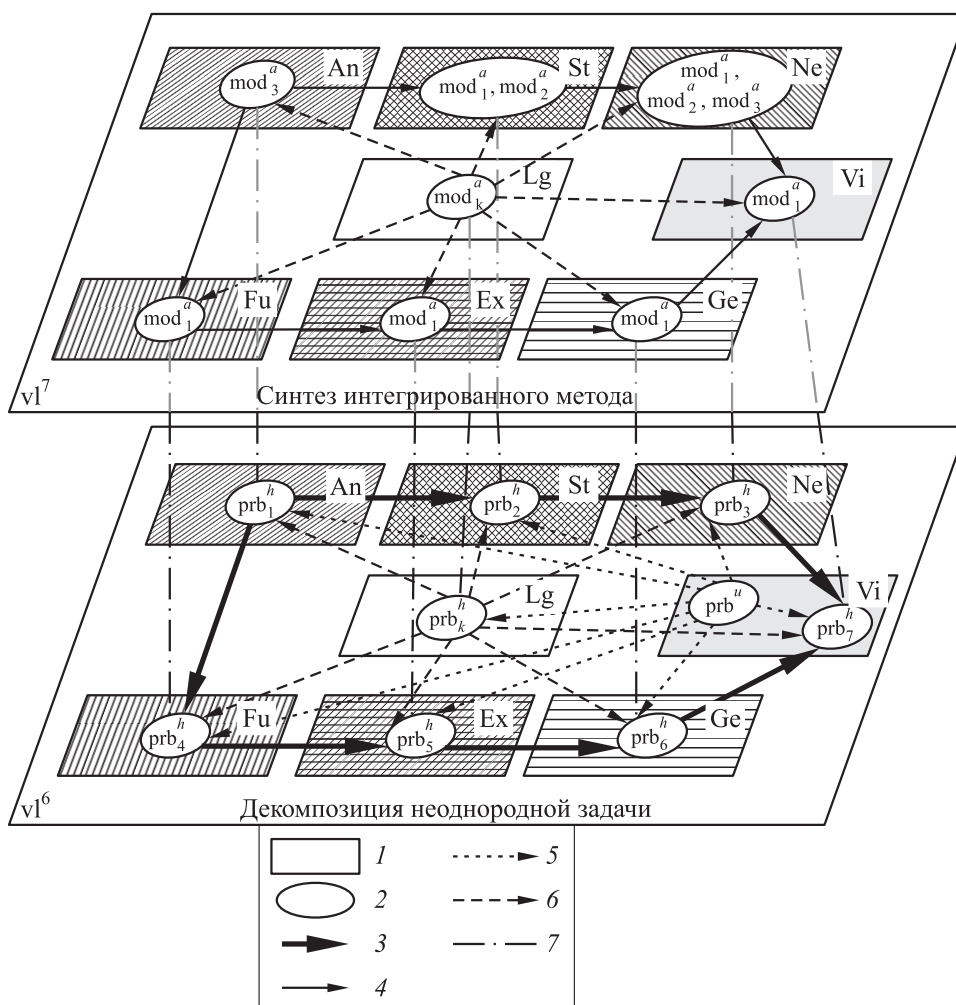


Рис. 1 Пример декомпозиции сложной задачи и синтеза интегрированного метода ее решения над ГВП: 1 — метаязык (область неоднородности); 2 — задача/модель решения; 3 — отношения декомпозиции; 4 — отношения интеграции; 5 — отношения включения; 6 — отношения координации; 7 — отношения релевантности моделей по задаче

3 Синтез гибридной интеллектуальной системы над гетерогенным визуальным полем

Учитывая, что одной задаче prb^h (индексы уровня языка для краткости опущены) в декомпозиции \widehat{prb}^u может соответствовать более одной модели mod_i^a ,

должна быть выполнена процедура оценки и определены правила выбора автономных моделей для каждой пары $\langle \text{prb}_\gamma^h, \text{prb}_\zeta^h \rangle$ с учетом состояния st модели, решающей prb_γ^h . Для ее реализации необходима система с базой знаний, которая создается на шестом этапе ПС-методологии «Спецификация областей релевантности методов» [2] и каждой модели mod_i^a ставит в соответствие экспертную или нечеткую оценку ее релевантности подзадаче prb^h . Также требуется выделить множество $\text{ST}^{\text{mod}} \in \text{ST}$ допустимых состояний каждой модели mod^a и задать множество $\text{VR}_1^{\text{res st}}$ отношений «быть в состоянии». Тогда может быть сформулирована задача конструирования ГиИС, релевантной prb^u .

Пусть разработаны декомпозиция $\widehat{\text{prb}}^u = \langle \text{PRB}^h, \text{VR}_3^{\text{prb prb}} \rangle$ неоднородной задачи в виде ориентированного графа без петель, ГВП GVF , таблица гибридных стратегий T^u для $\widehat{\text{prb}}^u$ [2], которые каждому отношению $\text{vr}_{3l}^{\text{prb prb}}(\text{prb}_\gamma^h, \text{prb}_\zeta^h) \in \widehat{\text{prb}}^u$, $\gamma, \zeta = [1, N_{\text{prbh}}]$, $\gamma \neq \zeta$, однозначно сопоставляют множество отношений интеграции $\{\text{vr}_1^{\text{res res}}\}$, $\{\text{vr}_1^{\text{res res}}\} \in \text{VR}_1^{\text{res res}}$, т. е. $\text{vr}_{3l}^{\text{prb prb}}(\text{prb}_\gamma^h, \text{prb}_\zeta^h) \rightarrow \{\text{res res vr}_1^n\}$, множество интерпретаторов автономных моделей, множество межмодельных интерфейсов, множество $\text{ST}^{\text{mod } x} \in \text{ST}$, $x \in [1, N_{\text{meta}}]$, допустимых состояний $\text{st}_\sigma^{\text{mod } x} \in \text{ST}^{\text{mod } x}$, $\sigma \in [1, N_{\text{stx}}]$ каждой модели mod_x^a . На множестве $\text{PRB}^h = \{\text{prb}_1^h, \dots, \text{prb}_{N_h}^h\}$ задан порядок, т. е. известна очередность решения prb^h : построено множество $\text{In} = \{\text{In}^1, \dots, \text{In}^{\text{NT}}\}$, где $\text{In}^1 = \{\text{in}_1, \dots, \text{in}_{\text{In}^1}\}$ — множество нижних индексов задач prb^h , решаемых в первую очередь, ..., $\text{In}^{\text{NT}} = \{\text{in}_1, \dots, \text{in}_{\text{In}^{\text{NT}}}\}$ — множество нижних индексов задач prb^h , решаемых в последнюю очередь. Установлены соответствия моделей и интерпретаторов, т. е. заданы методы решения однородных подзадач, а также моделей и межмодельных интерфейсов, т. е. заданы алгоритмы преобразования информации с одного языка на другие. Требуется найти список Ls^u , состоящий из отношений интеграции, установленных между моделями с учетом состояния, т. е. $\text{vr}_1^{\text{res st}}(\text{mod}_x^a, \text{st}_\sigma^{\text{mod } x}) \circ \text{vr}_1^{\text{res res}}(\text{mod}_x^a, \text{mod}_y^a)$, где $x, y \in [1, N_{\text{meta}}]$, а также множество E матриц «модель–модель» $E_j \in E_j^l \subseteq E$, $l \in [1, \text{NT}]$, строки которых соответствуют автономным моделям mod^a в состоянии $\text{st}_\sigma^{\text{mod } x}$ решения задачи prb_ζ^h , а столбцы — моделям mod^a задачи prb_γ^h . Отношение $\text{vr}_1^{\text{res st}}(\text{mod}_x^a, \text{st}_\sigma^{\text{mod } x})$ для краткости обозначим парой $\langle \text{mod}_\zeta^a, \text{st}_\sigma^{\text{mod } \zeta} \rangle$.

Тогда алгоритм (рис. 2) конструирования функциональной ГиИС, релевантной неоднородной задаче $\widehat{\text{prb}}^u$, представляется следующими шагами:

1. Начало, установить $l = 1$.
2. Выбрать из $\widehat{\text{prb}}^u$ множество троек $\text{VR}_{3\beta}^{\text{prb prb}} = \left\{ \text{vr}_{3\beta}^{\text{prb prb}}(\text{prb}_\gamma^h, \text{prb}_\zeta^h) \right\}$, $\beta = [1, N_{\text{prbh}}^l]$, в которых каждая prb_ζ^h имеет очередность из In^l .
3. Установить $j = 1$, $E^l = \emptyset$.

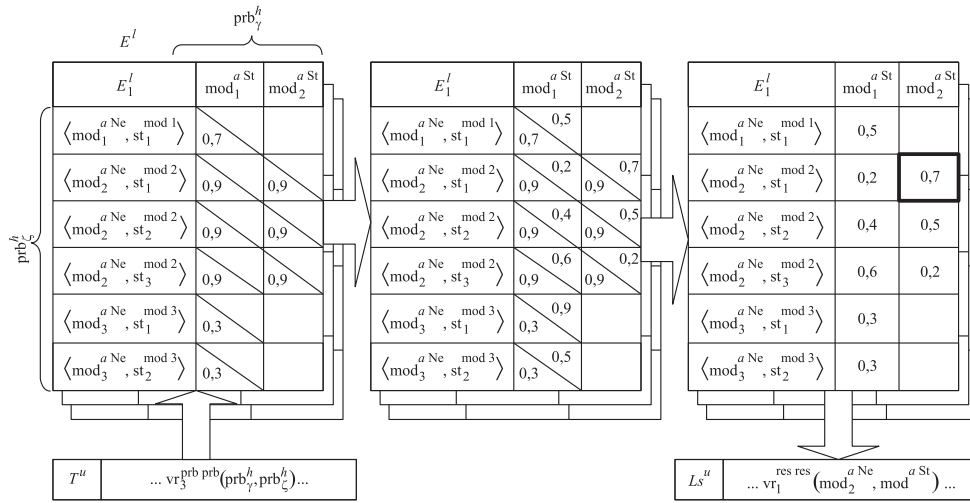


Рис. 2 Фрагмент алгоритма синтеза ГиИС с ГВП

4. Выбрать очередную j -ю пару из $\text{VR}_{3\beta}^{\text{prb prb}}$.
5. Инициализировать для j -й пары матрицу E_j^l , помечая столбцы ω моделями $\{\text{mod}_\omega^a\}$ задачи prb_γ^h , а строки q — моделями mod_q^a в состоянии $\text{st}_\sigma^{\text{mod } \zeta}$ задачи prb_ζ^h , т. е. парами $\{\langle \text{mod}_q^a, \text{st}_\sigma^{\text{mod } \zeta} \rangle\}$. Дополнить E^l матрицей E_j^l .
6. Проверить: $j = N_{\text{prbh}} + 1$? Если «нет», установить $j = j + 1$ и перейти к п. 4.
7. Установить $j = 1$.
8. Выбрать E_j^l из $E^l = \{E_1^l, \dots, E_{N_{\text{prbh}}}^l\}$. Используя таблицу гибридных стратегий, активировать только те элементы $\varepsilon_{q\omega}^j$ в E_j^l , для которых между mod_q^a и mod_ω^a существует отношение $\text{vr}_1^{\text{res res}}$ (на рис. 2 это показано перечеркиванием клетки матрицы E_j^l). Используя экспертную или нечеткую систему, получить оценки моделей $\{\text{mod}_q^a\}$ задачи prb_ζ^h , занося оценки в знаменатели $\downarrow \varepsilon_{q\omega}^j$ дробей-элементов $\varepsilon_{q\omega}^j$.
9. Моделировать решения prb_ζ^h на каждой модели в каждом состоянии из $\left\{ \text{vr}_1^{\text{res st}} \left(\text{mod}_q^a, \text{st}_\sigma^{\text{mod } q} \right) \right\}$ и полученные значения выходов модели mod_q^a использовать в качестве входов модели mod_ω^a . Используя экспертную или нечеткую систему, получить оценки моделей $\{\text{mod}_\omega^a\}$ задачи prb_γ^h , занося

оценки в числителе $\uparrow \varepsilon_{q\omega}^j$ дробей-элементов $\varepsilon_{q\omega}^j$. Для начальных состояний моделей выбрать пару моделей $\text{vr}_1^{\text{res res}}(\text{mod}_x^a, \text{mod}_y^a)$, $x, y \in [1, N_{\text{meta}}]$, с максимальным значением интегрированной оценки $\varepsilon_{q\omega}^j = \min(\uparrow \varepsilon_{q\omega}^j, \downarrow \varepsilon_{q\omega}^j)$ и занести ее в список Ls^u ;

10. Проверить: $j = N_{\text{prbh}} + 1$? Если «нет», установить $j = j + 1$ и перейти к п. 8.
11. Проверить: $l = N_T$? Если «нет», установить $l = l + 1$ и перейти к п. 2.
12. Дополнить список Ls^u списком интерпретаторов и интерфейсов.
13. Сформировать базу знаний координационного элемента из матриц E , чтобы в процессе функционирования ГиИС он мог перестраивать ее структуру, выбирая релевантную модель задачи для текущего состояния ГиИС и переходя при необходимости с символьных рассуждений на визуальные и обратно.
14. Инициализировать ГиИС в соответствии с Ls^u .

Предложенный алгоритм синтезирует новый интегрированный метод всякий раз при решении сложной задачи, обеспечивая его релевантность меняющимся условиям и структуре неоднородной задачи. При выборе моделей учитываются не только экспертные оценки их качества и релевантности подзадачам, но и эффективность совместной работы в составе ГиИС, т. е. интегрированный метод синтезируется как целостная система. Использование ГВП как основы для синтеза интегрированного метода позволяет комбинировать рассуждения на символьных и визуальных языках, применяя тип рассуждений, релевантный конкретной подзадаче в сложившихся условиях. В результате ГиИС с ГВП имитируют сотрудничество, относительность и дополнительность коллективного интеллекта для поиска решений на символьных и визуальных языках.

4 Заключение

Предложена модель ГВП как базис построения интегрированных методов с использованием ГиИС, рассуждающих на символьных и визуальных языках. Предложен алгоритм синтеза ГиИС с ГВП, учитывающий релевантность автономных моделей однородным подзадачам, а также взаимное влияние интегрируемых моделей в ГиИС.

Реализация предложенных моделей и алгоритмов в ГиИС позволит учитывать динамический характер сложных задач и синтезировать над ГВП релевантный на момент решения задачи интегрированный метод. Используя ГВП, устанавливающее взаимосвязь символьных и визуальных знаков (символьных и визуальных высказываний), ГиИС могут управлять имитационным процессом, подключая механизмы визуально-пространственного, образного мышления, когда возникает существенная неопределенность. Эти механизмы позволяют коллективу

«увидеть» приближенное решение сложной задачи или ее подзадач, которое впоследствии может быть обосновано и уточнено методами логико-математических рассуждений.

Литература

1. Колесников А. В., Листонад С. В., Румовская С. Б., Данишевский В. И. Неформальная аксиоматическая теория ролевых визуальных моделей // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 4. С. 114–120.
2. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. — СПб.: СПбГУ, 2001. 711 с.
3. Колесников А. В., Листонад С. В. Концептуально-визуальные основы виртуальных гетерогенных коллективов, поддерживающих принятие решений // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Мат-лы III Всеросс. Поспеловской конференции с международным участием. — Калининград: БФУ им. И. Канта, 2016. С. 8–56.
4. Bowman W. J. Graphic communication. — New York, NY, USA: John Wiley, 1968. 210 p.
5. Lakin F. Visual grammars for visual languages // 6th National Conference on Artificial Intelligence Proceedings. — Menlo Park, CA, USA: AAAI Press, 1987. P. 683–688.
6. Narayanan N. H., Hubscher R. Visual language theory: Towards a human-computer interaction perspective // Visual language theory. — New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1998. P. 81–128.
7. Осинов Г. С. От ситуационного управления к прикладной семиотике // Новости искусственного интеллекта, 2002. № 6(54). С. 3–7.
8. Sibbet D. Visual leaders: New tools for visioning, management, and organization change. — Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013. 229 p.
9. Fitrianie S., Rothkrantz L. J. M. Two-dimensional visual language grammar. <http://mmi.tudelft.nl/pub/siska/TSD%202DVisLangGrammar.pdf>.
10. Kremer R. Visual languages for knowledge representation. <http://ksi.cpsc.ualgary.ca/KAW/KAW98/kremer>.
11. Тарасов В. Б. Проблема понимания: настоящее и будущее искусственного интеллекта // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: Мат-лы V Междунар. научн.-технич. конф. — Минск: БГУИР, 2015. С. 25–42.
12. Колесников А. В., Солдатов С. А. Теоретические основы решения сложной задачи оперативно-производственного планирования с учетом координации // Вестник Российского государственного университета им. Иммануила Канта. Серия: Физико-математические науки, 2009. Вып. 10. С. 82–96.

Поступила в редакцию 15.08.17

ALGORITHM FOR SYNTHESIS OF FUNCTIONAL HYBRID INTELLIGENT SYSTEMS WITH A HETEROGENEOUS VISUAL FIELD

A. Kolesnikov^{1,2} and S. Listopad²

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation

²Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str, Kaliningrad 236000, Russian Federation

Abstract: The article presents an algorithm for synthesis of a new class of intelligent systems that is hybrid intelligent systems with a heterogeneous visual field modeling the integration of collective symbolic and visual reasoning. To implement such reasoning, the formalized model of visual languages is used based on the concept of a semiotic system according to D. A. Pospelov, as well as A. V. Kolesnikov multilayered model of professional languages. Hybrid intelligent systems with a heterogeneous visual field will be able to control the simulation process and, depending on the uncertainty of the problem situation, alternately activate the symbolic or visual mechanisms of reasoning, imitating “jumps” in the hybrid state space corresponding to instantaneous insight (enlightening) of the real expert teams.

Keywords: hybrid intelligent system; heterogeneous visual field; visual reasoning

DOI: 10.14357/08696527170310

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16-07-00271a).

References

1. Kolesnikov, A. V., S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and V. I. Danishevskiy. 2016. Neformal'naya aksiomaticheskaya teoriya rolevykh vizual'nykh modeley [Informal axiomatic theory of the role visual models]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(4):114–120.
2. Kolesnikov, A. V. 2001. *Gibridnye intellektual'nye sistemy. Teoriya i tekhnologiya razrabotki* [Hybrid intelligent systems. Theory and technology of development]. St. Petersburg: SPbGTU Publ. 711 p.
3. Kolesnikov, A. V., and S. V. Listopad. 2016. Kontseptual'no-vizual'nye osnovy virtual'nykh geterogennykh kollektivov, podderzhivayushchikh prinyatie resheniy [Conceptual and visual foundations of heterogeneous collective, supporting the decision-making process].

- tual and visual basics of virtual heterogeneous teams supporting decision-making]. *Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy: Mat-ly III Vseross. Pospelovskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [3rd All-Russia Pospelov Conference with International Participation “Hybrid and Synergistic Intelligent Systems” Proceedings]. Kaliningrad: IKBFU Publ. 8–56.
4. Bowman, W. J. 1968. *Graphic communication*. New York, NY: John Wiley. 210 p
 5. Lakin, F. 1987. Visual grammars for visual languages. *6th National Conference on Artificial Intelligence Proceedings*. Menlo Park, CA: AAAI Press. 683–688.
 6. Narayanan, N. H., and R. Hubscher. 1998. Visual language theory: Towards a human–computer interaction perspective. *Visual language theory*. New York, NY: Springer-Verlag. 81–128.
 7. Osipov, G. S. 2002. Ot situatsionnogo upravleniya k prikladnoy semiotike [From situational management to applied semiotics]. *Novosti iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence News] 6(54):3–7.
 8. Sibbet, D. 2013. *Visual leaders: New tools for visioning, management, and organization change*. Hoboken, NJ: Wiley. 229 p.
 9. Fitrianie, S., and L. J. M. Rothkrantz. Two-dimensional visual language grammar. Available at: <http://mmi.tudelft.nl/pub/siska/TSD%20DVisLangGrammar.pdf> (accessed July 28, 2017).
 10. Kremer, R. Visual languages for knowledge representation. Available at: <http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW98/kremer/> (accessed July 28, 2017).
 11. Tarasov, V. B. 2015. Problema ponimaniya: nastoyashchee i budushchee iskusstvennogo intellekta [The problem of understanding: The present and the future of artificial intelligence]. *5th Scientific and Technical Conference (International) “Open Semantic Technologies for Intelligent Systems” Proceedings*. Minsk: BSUIR. 25–42.
 12. Kolesnikov, A. V., and S. A. Soldatov. 2009. Teoreticheskie osnovy resheniya slozhnoy zadachi operativno-proizvodstvennogo planirovaniya s uchetom koordinatsii [Theoretical basis for solving a complex problems of operational and production planning with regard to the coordination]. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta im. Immanuila Kanta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of the Russian State University of Immanuel Kant. Physics and mathematics ser.] 10:82–96.

Received August 15, 2017

Contributors

Kolesnikov Alexander V. (b. 1948) — Doctor of Sciences in technology; professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str, Kaliningrad 236000, Russian Federation; avkolesnikov@yandex.ru

Listopad Sergey V. (b. 1984) — Candidate of Sciences in technology; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str, Kaliningrad 236000, Russian Federation; ser-list-post@yandex.ru

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА*

С. К. Дулин¹, Н. Г. Дулина², Д. А. Якушев³

Аннотация: Рассмотрено формализованное представление технологической возможности получения геопространственных данных в рамках единой системы сбора геопространственной информации для автоматизации мониторинга инфраструктуры железнодорожного (ж/д) транспорта (ИЖД) в высокоточном координатном пространстве. В условиях повышающихся требований к доступности и оперативности геопространственной информации мобильное лазерное сканирование является наиболее эффективным решением современных технологий сбора и обработки геоданных для создания картографических материалов, паспортизации, мониторинга и фиксации состояния инфраструктурных транспортных объектов. В процессе реализации проектов по проверке фактического положения объектов ж/д инфраструктуры была разработана и апробирована уникальная сквозная технология съемки и обработки пространственных данных, позволяющая, с одной стороны, минимизировать затраты на обработку, а с другой — повысить контролируемость процесса и точность синтеза геоданных.

Ключевые слова: мониторинг инфраструктуры ж/д транспорта; геопространственная информация; мобильное лазерное сканирование

DOI: 10.14357/08696527170311

1 Введение

Геоинформационный синтез (*geoinformation fusion*) — это процесс объединения географической информации из разнообразных источников для получения новой, более ценной информации, обладающей большей значимостью и надежностью [1]. Геоинформационный синтез — важная функция интероперабельной и доступной через Web геоинформационной системы (ГИС). Увеличение надежности распределенного доступа через Web к геоинформации, соответственно, повышает требования к эффективному и быстрому синтезу геоинформации из разнородных источников.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 17-20-02153 офи.м.РЖД).

¹ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, s.dulin@ccas.ru

² Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ngdulina@mail.ru

³ ОАО «НИИАС», yakush.d@gmail.com

Первоочередной проблемой, стоящей перед любой системой геоинформационного синтеза, является *семантическая разнородность*, когда понятия и категории, используемые в разных геоинформационных источниках, имеют несовместимые значения. Большинство современных геоинформационных методик синтеза существенно зависят от человеческого восприятия проблемной области. В этой работе рассматриваются вопросы географического информационного синтеза с использованием *индуктивного вывода*. Индуктивный вывод позволяет провести рассуждения от конкретных случаев до общих правил. В контексте геоинформационного синтеза индуктивный вывод может использоваться, чтобы определить семантические отношения между категориями геообъектов из пространственных отношений между наборами определенных объектов. Однако индуктивный вывод считается не очень надежным, особенно при наличии неопределенности. Следовательно, сомнительная надежность — ключевое препятствие, стоящее перед любой автоматизированной системой геоинформационного синтеза, основанной на индуктивном выводе, поскольку геоинформации свойственна неопределенность.

Самый важный шаг в процессе информационного синтеза должен соединять онтологии разных информационных источников. При этом следует различать процесс идентификации отношений между соответствующими элементами в двух гетерогенных онтологиях, называемый «отображением», и процесс построения единственной объединенной онтологии, основанной на этих идентифицированных отношениях, называемый «интеграцией» [2].

Под отображением онтологий (*ontology alignment*) понимается процесс установления соответствия между концептами разных онтологий. Проще говоря, при отображении онтологий для каждого концепта отношения или экземпляра некоторой онтологии находятся соответственные элементы в других онтологиях. Проблема отображения онтологий тесно связана с задачей синтеза данных (*data fusion*) и особенно актуальна при интеграции разнородных баз данных, функционирующих независимо друг от друга. Средства отображения онтологий выделяют семантически эквивалентные классы данных, например «Электровоз» и «Локомотив», которые в общем случае не совпадают, поэтому требуются дополнительные процедуры для определения сходства: синтаксические, внешние и семантические. Эта проблема также важна при реализации семантической интероперабельности в *Semantic Web* [3], когда каждый из взаимодействующих пользователей сети, который разработал свои онтологии, рассчитывает на согласованное использование разнородных ресурсов. В среде *Semantic Web* существует много примеров успешного решения проблемы синтеза данных на основе онтологий, но не преодолены пока жесткие требования специальной подготовки интегрируемых данных и семантический диссонанс при неоднократном использовании онтологий.

2 Географический синтез пространственных данных

Исследование синтеза геоинформации предполагает использование более общих подходов, чем в случае атрибутивного информационного синтеза. Гео-

информационная система с формальными представлениями геоонтологий имеет перспективы улучшения информационной интеграции на основе онтологий, если известны семантические отношения между зафиксированными онтологиями.

В основе пространственного подхода к геоинформационному синтезу всегда лежит процесс выведения семантических отношений из пространственных. Этот процесс может иметь характер индуктивного вывода, моделирующего рассуждение от конкретных случаев до общих правил. Тем самым пространственный подход к геоинформационному синтезу создает общедоступный «словарь» для того, чтобы устанавливать соответствия между онтологиями разных информационных источников, основанные на отношениях между пространственными степенями категорий, используемых в этих информационных источниках. Рисунок 1 содержит простой пример информационного синтеза пространственных данных. На рис. 1 каждый набор данных включает пространственный компонент и интенциональный компонент.

Географические степени наборов ж/д данных и данных кадастровой палаты идентичны (т.е. наборы данных покрывают одну и ту же область). Таким

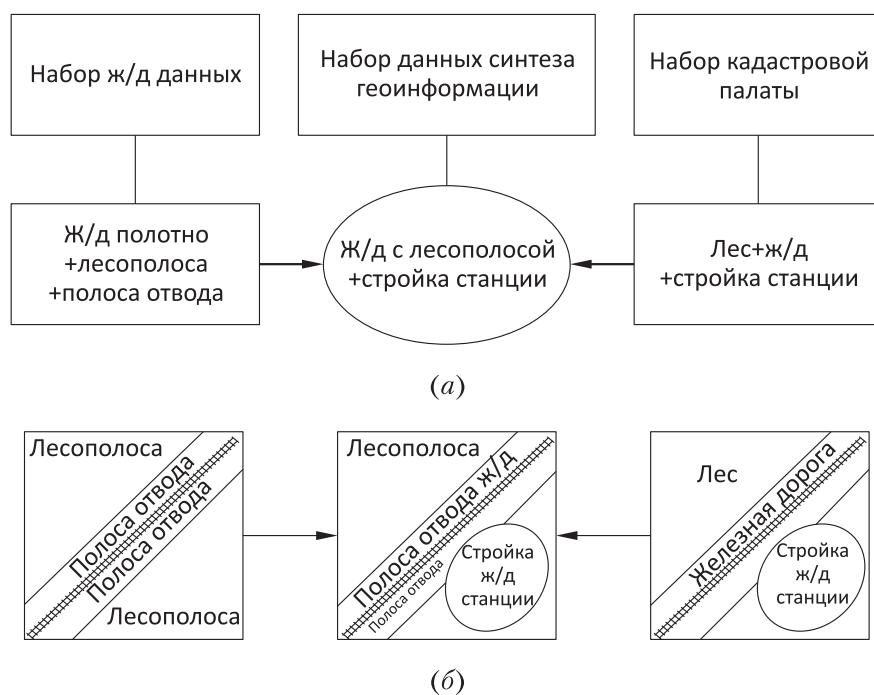


Рис. 1 Упрощенный пример геоинформационного синтеза: (а) интенциональный компонент; (б) отображенные пространственные данные (ж/д с полосой отвода)

образом, рис. 1 представляет ситуацию, когда два учреждения отобразили одну и ту же географическую область, используя разные онтологии. Отметим, что, хотя синтез сильно упрощен, процесс, проиллюстрированный рис. 1, не просто оверлей. Наборы данных были подвергнуты синтезу в том смысле, что получена некая новая информация об отношениях между категориями, представленными в каждом из входных наборов данных.

Описанный выше на простом примере процесс синтеза предполагает, что для работы любой системы в реальных условиях необходимо формализовать правила, требуемые для индуктивного процесса вывода результатов синтеза, с последующей реализацией их в системе автоматизации синтеза данных. Наверное, следует начать с представления таксономии как частично упорядоченного набора (C, \leq) [4], где C — множество категорий; \leq — упорядочение (отношение категоризации) на этих категориях. Тогда набор геоданных может быть представлен как набор S , в который входит часть области, таксономия (C, \leq) и функция $e: C \rightarrow 2^S$, которая определяет, какие пространственные области маркированы категориями (2^S — мощность множества S). Таким образом, e связывает каждую категорию в таксономии с уникальным набором элементов пространства S . Функцию, подобную e , принято называть функцией расширения, поскольку она обеспечивает экстенциональную форму представления каждой категории в контексте ее набора данных.

В частности, для набора ж/д данных на рис. 1 таксономия $(C_{ж/д}, \leq_{ж/д})$ представлена иерархией категорий; пространственная область $S_{ж/д}$ представлена непосредственно картой, состоящей из выделенных подобластей; а функция расширения $e_{ж/д}$ представлена метками как на таксономии, так и на карте (т. е. для каждой категории можно идентифицировать на карте набор местоположений, которые маркированы как определенная категория).

Можно определить простые логические правила первого уровня, которые обеспечивают индуктивный процесс вывода. Пусть для двух наборов данных $C_1 = \{S_1, (C_1, \leq_1), e_1\}$ и $C_2 = \{S_2, (C_2, \leq_2), e_2\}$ нужно создать набор данных синтеза $C_f = \{S_f, (C_f, \leq_f), e_f\}$. Тогда в качестве первого правила можно определить следующее:

$$\text{for all } x \in S_1 \ \& \ y \in S_2 \ \begin{cases} \text{if } e_1(x) \in e_2(y) \text{ then } x \leq_f y; \\ \text{if } e_2(x) \in e_1(y) \text{ then } y \leq_f x. \end{cases}$$

Другими словами, там, где пространственное расширение категории a содержится в пространственном расширении категории b , a является подкатегорией b в объединенной таксономии. Точно так же можно сформулировать правила для пространственных отношений между пространственными формами двух категорий:

$$\text{for all } x \in C_1 \ \text{and } y \in C_2 \ \text{if } e_1(x) \cap e_2(y) = \emptyset \ \text{then } x \not\leq_f y \ \text{and } y \not\leq_f x.$$

Это правило утверждает, что если расширения двух категорий x и y являются непересекающимися, то категории не сравнимы. Дальнейшее очевидное правило определяет создание новой категории, соответствующей наложению двух расширений категории:

for all $x \in C_1$ and $y \in C_2$ if $e_1(x) \cap e_2(y) \neq \emptyset$ and $e_1(x) \not\subseteq e_2(y)$ and $e_2(x) \not\subseteq e_1(y)$
then $x \cap y \in C_f$ and $x \cap y \leq_f x$ and $x \cap y \leq_f y$.

Приведенное правило позволяет создать новую категорию $x \cap y$ в объединенной таксономии, которая располагается на пересечении категорий x и y . Для двух наборов данных C_1 и C_2 выводы из таких правил формируют отношение упорядочения, которое связывает категории в двух источниках таксономий. Вместе с теми отношениями, упорядочивающими эти источники, возникает возможность образования нового объединенного частичного порядка в C_f , который определяет категоризацию отношений между категориями в разных таксономиях C_1 и C_2 .

Формализованные правила ввиду их достаточной простоты могут быть легко реализованы в системах автоматизации синтеза данных. Преимущество использования логик описания состоит в том, что любые несогласованности между выбранными правилами могут быть автоматически обнаружены при проверке согласованности и анализа выполнимости. Если сгенерировать отображение онтологии, то пространственные данные могут быть автоматически объединены на основании стандартных геоинформационных методик интеграции (т. е. наложением двух пространственных наборов данных и приписыванием каждой объединенной области категории из объединенного частичного порядка, которая находится на пересечении двух исходных категорий объединенной области).

3 Моделирование данных синтеза на примере распознавания железнодорожных опор контактной сети

Программные продукты с автоматическими возможностями получения необходимых данных из результатов трехмерного (3D) измерения для различных функциональных задач придерживаются принципа разделения геоданных для каждой из них, и в большинстве случаев геоданные могут быть адаптированы для использования совместно в одной базе геоданных.

Рассмотрим далее получение геоданных, предназначенных для синтеза, на примере автоматической/полуавтоматической идентификации пространственных объектов по облаку точек лазерного сканирования, позволяющих, с одной стороны, минимизировать затраты на обработку, а с другой — повысить контролируемость процесса и точность синтеза с геоданными, полученными другими инструментами.

Мобильная сканирующая система — это сложный информационно-коммуникационный комплекс, позволяющий на движущемся транспортном средстве в любое время суток собирать данные о пространственном расположении зда-

ний и сооружений какой-либо местности. Получение трехмерного изображения происходит с привязкой к единой системе координат и практически представляет собой динамическое распознавание сцен. В плане конструктивных решений данная технология аналогична лазерной аэрофотосъемке (воздушное лазерное сканирование), однако с точки зрения моделирования предметной среды технология мобильного лазерного сканирования является предпочтительной, обеспечивая непрерывность и плотность критически важных для интеллектуального мониторинга транспортной инфраструктуры геоданных.

Одним из ключевых моментов обработки данных мобильного лазерного сканирования (где в качестве датчика используется лазерный сканер (рис. 2)) является преобразование входной информации (представленной в виде точек лазерного сканирования) в векторный вид (3D-модель) для проведения высокоточных вычислений в местной ж/д системе координат. Настраиваемая векторная модель в данном случае выступает в роли «носителя» объединенной семантической и пространственной информации о каждом конкретном объекте ИЖТ.

Применяемое геодезическое оборудование постоянно совершенствуется, и это приводит к валлообразному увеличению входной информации. В связи с этим необходима технология обработки пространственных данных, основанная на распараллеливании операций и возможности автоматизации каждой конкретной операции по моделированию, что минимизирует время от проведения съемки

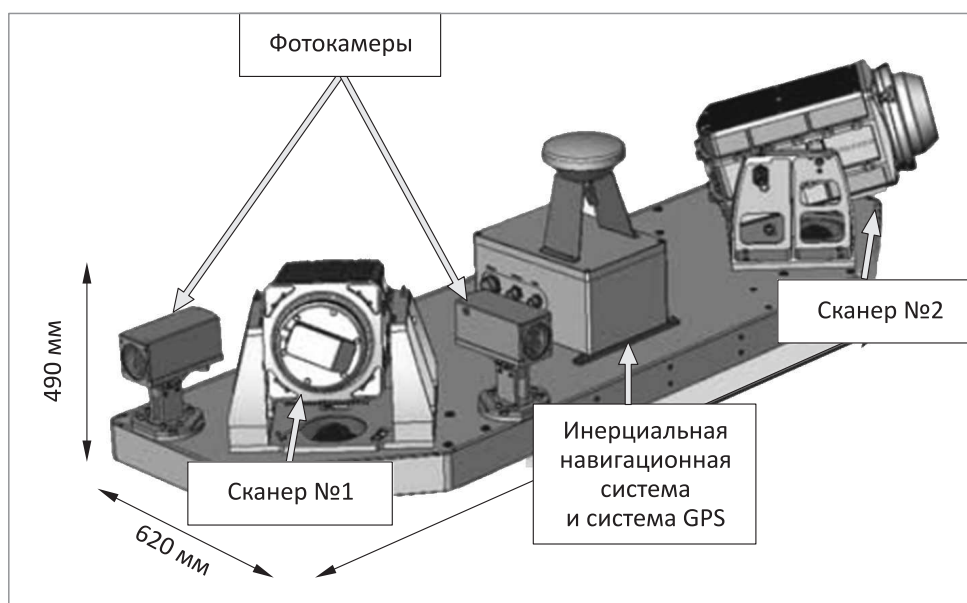


Рис. 2 Компоновка элементов мобильной лазерной системы (IFLEX.Optech)

до получения конечного результата, в виде пространственной базы данных информационного синтеза описаний объектов ИЖТ.

Одной из перспективных задач является корректное разделение входной информации (точек лазерного отражения) на принадлежащую «искусственным объектам» и «естественным объектам» (например, трава, деревья). Разделение информации по такому признаку позволит снять ряд принципиальных ограничений, существенно влияющих на скорость получения ответа на ключевой вопрос: какому конкретному объекту (или не объекту) принадлежит каждая точка, полученная в результате измерения системой мобильного лазерного сканирования. По сути, эта задача относится к интеллектуальным самообучаемым системам распознавания образов.

Основным критерием для разделения точек лазерного отражения на искусственное/естественное является признак группировки точек на основании анализа вектора нормали. Идея состоит в том, чтобы выставить систему координат с осью X в направлении движения сканирующей системы и просчитать нормали для каждой точки лазерного отражения в плоскостях X, Y, Z [5]. Далее группировать точки с близкими значениями нормалей и построить по ним поверхность, например методом триангуляции Делоне [4]. Так как классификация земли проведена заранее и исключена из расчетов, предполагается, что данные поверхности будут в основном принадлежать искусственным объектам. Оставшиеся точки можно классифицировать относительно полученных поверхностей, пользуясь методом опорных векторов для стандартной задачи классификации [6]. Получив в результате вышеописанных манипуляций точки, принадлежащие искусственным объектам, можно попытаться найти алгоритм интеллектуальной идентификации стандартизованных элементов ИЖТ в облаке точек либо использовать их в разработанных алгоритмах автоматизации построения высокоточных трехмерных моделей ИЖТ.

В настоящее время в рамках работ по адаптивной идентификации пространственных объектов в системе мобильного лазерного сканирования решена обратная задача — оператор (человек) визуально определяет (распознает) вид объекта, автоматически/полуавтоматически формирует (моделирует) векторное представление объекта, по которому классифицируются точки лазерного отражения и каждой точке может быть присвоена характеристика этого объекта (рис. 3).

В части автоматизации моделирования объектов ИЖТ были разработаны алгоритмы автоматического распознавания опор контактной сети по точкам лазерного сканирования.

Приведем краткое описание разработанных алгоритмов и методов идентификации элементов ИЖТ на примере ж/д опор контактной сети.

Предлагается решение трех задач. Первая задача состоит в автоматическом поиске опор контактной сети внутри облака точек или в обнаружении точек которые являются откликами от опор контактной сети. Вторая задача состоит в выборе подходящих 3D-моделей опор контактной сети, позволяющих осуще-

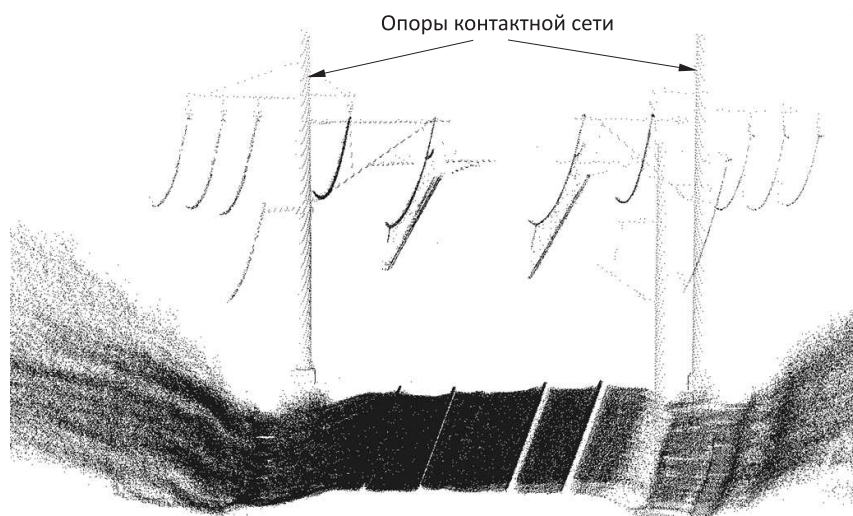


Рис. 3 Точки отражения лазерного сканирования

ствлять их автоматическую идентификацию. Третья задача состоит в нахождении оценок параметров положения объектов типа «опора контактной сети» и связана с применением алгоритмов оптимизации. Для решения указанных задач предлагается использовать обобщенное преобразование Хафа и аналитические функции расстояния. Задачу оценки параметров пространственного положения опоры контактной сети предлагается решать с помощью вероятностных генетических алгоритмов.

Будем считать, что точки, полученные в результате сканирования, заданы в декартовой системе координат и ось O_z выбрана перпендикулярно поверхности земли. Тогда точки, лежащие на одной прямой, перпендикулярной поверхности земли, будут иметь одинаковые координаты по оси O_x и оси O_y . Очевидно, что каждая такая прямая однозначно определяется координатами x и y и данное преобразование можно рассматривать как обобщение преобразования Хафа для обнаружения прямых одной направленности в облаке трехмерных точек. С учетом этого имеем множество точек $(x_i, y_i, z_i)_{i=1}^N$, и поиск точек, расположенных на прямых, параллельных оси O_z , можно осуществлять с помощью следующей процедуры:

1. Построение гистограммы в плоскости O_{xy} :

$$x_{\min} = \min_{i=1, \dots, N} x_i; \quad x_{\max} = \max_{i=1, \dots, N} x_i;$$

$$y_{\min} = \min_{i=1, \dots, N} y_i; \quad y_{\max} = \max_{i=1, \dots, N} y_i;$$

выбор N_x — числа ячеек гистограммы вдоль оси O_x ;
 выбор N_y — числа ячеек гистограммы вдоль оси O_y ;
 построение гистограммы, которая описывается с помощью целочисленного массива чисел $(q_{ij})_{N_x \times N_y}$:

$$q_{ij} := 0, \quad i = 1, \dots, N_x, \quad j = 1, \dots, N_y, \quad k := 1, \dots, N,$$

$$i := \text{floor} \left(\frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} N_x \right); \quad j := \text{floor} \left(\frac{y_k - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} N_y \right),$$

$$q_{ij} := q_{ij} + 1.$$

2. Нахождение локальных максимумов в гистограмме q_{ij} .
3. Пусть q_{ij} — это локальный максимум гистограммы, тогда соответствующие координаты точки в плоскости O_{xy} можно найти по формулам:

$$x_{\text{line}} = \frac{i(x_{\max} - x_{\min})}{N_x} + x_{\min}, \quad y_{\text{line}} = \frac{j(y_{\max} - y_{\min})}{N_y} + y_{\min}.$$

По найденным прямым можно выделить точки, относящиеся к опорам контактной сети. Для этого вводится параметр h , с помощью которого выделяются все точки, которые расположены на расстоянии не более h от найденной прямой:

$$\left\{ (x_i, y_i, z_i) \mid (x_i - x_{\text{line}})^2 + (y_i - y_{\text{line}})^2 \leq h^2 \right\}.$$

После рассмотренной процедуры обнаружения опор контактной сети требуется провести их идентификацию и уточнить параметры их пространственного положения. Это делается с помощью трехмерных моделей, базирующихся на аналитических функциях расстояния, а также метода глобальной оптимизации, основанного на принципах построения генетических вероятностных алгоритмов [7].

Будем считать, что имеется трехмерная модель опоры контактной сети, заданная функцией расстояния $f(x, a)$, которая дает расстояние от точки x до объекта, пространственное положение которого, а также другие характеристики определяет вектор параметров a . Тогда оценивание вектора параметров по множеству точек $X = \{x_i\}$ может быть получено как решение оптимизационной задачи

$$F(X, a) = \sum_{x_i \in X} f^2(x_i, a) \rightarrow \min$$

относительно вектора параметров a . Поскольку функционал $F(X, a)$, как правило, имеет неважные дифференциальные свойства, которые желательны для применения классических методов оптимизации, предлагается метод оптимизации,

основанный на идее, используемой при построении вероятностных генетических алгоритмов. Данная идея заключается в следующем. Предположим, что имеется вероятностное распределение вектора параметров a , отражающее информацию о возможных отклонениях a от нормативных показателей. По этому распределению генерируется выборка (популяция) решений. Далее проводится селекция выборки: из нее удаляются менее оптимальные решения. После этого по усеченной выборке оценивается новое вероятностное распределение решений, и рассмотренные выше этапы повторяются. Теоретически получаемая последовательность вероятностных распределений должна сходиться к точечному вероятностному распределению Дирака, которое и определяет искомым глобальный экстремум. При этом рассматриваемая задача значительно упрощается, если предположить независимость параметров в генерируемых выборках. Такое предположение является достаточно правдоподобным, если считать, что искомые параметры незначительно отклоняются от нормативных. В этом случае можно предположить, что вероятностное распределение каждого параметра можно аппроксимировать нормальным распределением. Пользуясь предположениями, описанными выше, можно формализовать предлагаемую схему вычислений с помощью следующей процедуры.

0. Входные данные: функция расстояния $f(x, a)$, $a^{(0)}$ — начальное значение вектора параметров, $\sigma^{(0)}$ — начальный вектор среднеквадратических отклонений параметра a , $i:=0$.
1. Генерация выборки возможных решений $\{a_1, \dots, a_N\}$ и ее упорядочение таким образом, чтобы $F(X, a_1) \leq F(X, a_2) \leq \dots \leq F(X, a_N)$.
2. Усечение выборки: в ней оставляются наиболее оптимальные решения до некоторого индекса N_1 (N_1 — это параметр алгоритма, который выбирается равным $0,3N$).
3. Нахождение оценок математического ожидания и среднеквадратических отклонений по усеченной выборке $\{a_1, \dots, a_{N_1}\}$:

$$a^{(i+1)} = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} a_k, \quad \sigma^{(i+1)} = \sqrt{\frac{1}{N_1 - 1} \sum_{k=1}^{N_1} (a_k - a^{(i+1)})^2},$$

причем в последней формуле операции возведения в степень и извлечения корня предполагаются покоординатными.

4. $i:=i + 1$. Если $|\sigma^{(i)}| \leq \varepsilon$, то в качестве решения выбирается $a^{(i)}$, иначе переход к шагу 1.

Программные продукты с автоматическими возможностями получения необходимой информации из результатов трехмерного измерения для той или иной функциональной задачи придерживаются принципа разделения геоданных для каждой из них и в большинстве случаев могут быть адаптированы для использования совместно в одной базе геоданных.

4 Дерево зависимости показаний датчика

В теории баз данных оптимизация запроса обычно формулируется относительно плана выполнения запроса, заданного графом. Вершины графа представляют собой различные операции базы данных, которые должны быть выполнены. Обработка запроса, составленного на основе показаний датчиков, может быть организована подобно плану выполнения запроса. Для этого вводится понятие *дерева зависимости показаний датчика* [8], в котором каждая вершина V_i имеет следующие параметры:

ТО $_i$ — тип объекта, который будет распознан {признан};

ИИ $_i$ — информационный источник;

Алг $_i$ — алгоритм распознавания объекта {цели}, который будет применен;

ПК $_i$ — пространственные координаты, выбранные инициатором запроса;

ВК $_i$ — временные координаты, выбранные инициатором запроса;

ПО $_i$ — выбранная пространственная область для распознавания объекта;

ВИ $_i$ — выбранный временной интервал распознавания объекта;

ВРО $_i$ — предполагаемое время распознавания объекта;

ДН $_i$ — диапазон надежности применения алгоритма распознавания, максимум — $[0,1]$.

Эти параметры обеспечивают подробную информацию для каждого шага обработки запроса на основе показаний датчика. Для эволюционных запросов требуются пространственные / временные координаты инициатора запроса. Для другого типа запросов эти параметры являются дополнительными. Если для получения результатов обработки в вершине V_1 необходим вход к другой вершине V_2 , то должна существовать направленная дуга от V_1 к V_2 . Направленные дуги идут от листьев и заканчиваются в корне. Листья дерева — информационные источники типа лазерного сканера (ЛС), инфракрасной камеры (ИК) или фотокамеры (ФК). Они имеют параметры типа (неизвестно, ЛС, неизвестно, ПК $_i$, ВК $_i$, ПО $_{all}$, ВИ $_{all}$, 0, (1, 1)).

Промежуточные вершины дерева — объекты, которые необходимо распознать и дополнить объединенной информацией. Например, предположите, что тип объекта — ‘опора контактной сети’. Промежуточный узел может иметь параметры (‘опора контактной сети’, ЛС, АлгХафа, ПК $_i$, ВК $_i$, ПО $_{all}$, ВИ $_{all}$, 10, (0,3, 0,5)).

Корневая вершина — результат синтеза геоинформации, например вершина с параметрами (‘опора контактной сети’, ALL, Алг_fusion, ПК $_i$, ВК $_i$, ПО $_{all}$, ВИ $_{all}$, 2000, (0,1)), где параметр ALL указывает, что информация получена из всех источников.

Обработка запросов приводит к обновлениям дерева зависимости *показаний* датчика. В течение каждой итерации выбирается одна или более вершин, которые не должны зависеть от других вершин. После вычисления одна или

больше вершин удаляются из дерева зависимости *показаний* датчика. Процесс повторяется. Например, анализируя начальный запрос, создается следующее дерево зависимости *показаний* датчика:

(неизвестно, ЛС, неизвестно, 0, (1,1)) \otimes
(‘опора контактной сети’, ЛС, АлгХафа, 10, (0,3, 0,5)) \otimes
(неизвестно, ИК, неизвестно, 0, (1,1)) \otimes
(‘опора контактной сети’, ИК, АлгХока, 2000, (0,5, 0,7)) \otimes
(неизвестно, ФК, неизвестно, 0, (1,1)) \otimes
(‘опора контактной сети’, ФК, АлгEigenface, 100, (0, 1))
→ (‘опора контактной сети’, ALL, Алг_fusion, 2000, (0, 1)).

Это означает, что информация взята из трех источников: лазерный сканер, инфракрасная камера и фотокамера — и информация содержит объединенные данные об объекте ‘опора контактной сети’. Все доопределенные вершины теперь могут быть отобраны, и получается следующее обновленное дерево зависимости *показаний* датчика:

(‘опора контактной сети’, ЛС, АлгХафа, 10, (0,3, 0,5)) \otimes
(‘опора контактной сети’, ИК, АлгХока, 2000, (0,5, 0,7)) \otimes
(‘опора контактной сети’, ФК, АлгEigenface, 100, (0, 1))
→ (‘опора контактной сети’, ALL, Алг_fusion, 2000, (0, 1)).

Если вершина с объединенными данными верифицируема, то можно оставить эту вершину, удалив вершины с промежуточными данными. Так как необработанных вершин больше нет, то остается единственная вершина:

(‘опора контактной сети’, ALL, Алг_fusion, 2000, (0, 1)).

5 Комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта

Описанные выше подходы нашли свое применение в информационном обеспечении проектирования, строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов ж/д инфраструктуры. Комплексная система пространственных данных (КСПД) ИЖТ разрабатывается в соответствии с Распоряжением Президента ОАО «РЖД» от 3 декабря 2010 г. № 2511р «О создании комплексной системы пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта».

Гетерогенность геоданных, подлежащих комплексированию и синтезу в КСПД ИЖТ, выдвигает на передний план решение задачи геоинтероперабельности отраслевого масштаба [9] как задачи совместного согласованного использования геоданных, полученных из разных информационных источников (рис. 4). При этом функционал КСПД ИЖТ поддерживает решение следующих задач:

- централизация и унификация процессов сбора, обработки и использования пространственных данных — ведение геоинформационной базы данных (ГБД);

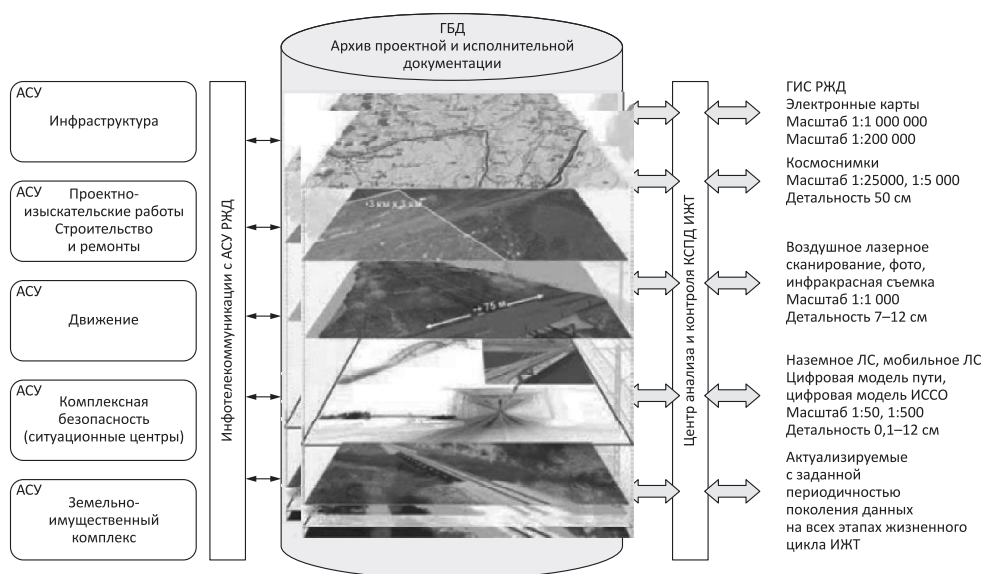


Рис. 4 Реализуемый функционал КСПД ИЖТ [6]

- информационное обеспечение процессов комплексной оценки технического состояния объектов инфраструктуры;
- планирование ремонтных работ объектов инфраструктуры по оцениваемому состоянию;
- информационная поддержка процесса проектного содержания пути — комплексное решение с учетом всей имеющейся информации;
- оценка антропогенных и природных угроз безопасности движения путем выявления мест, представляющих потенциальную опасность;
- планирование перевозок негабаритных грузов;
- информационная поддержка принятия стратегических решений путем интеграции данных об инфраструктуре, оперативности их выбора по любому заданному критерию, наглядности их представления как в графической, так и в табличной форме.

Для моделирования и распознавания объектов ж/д инфраструктуры используются данные мобильного лазерного сканирования и файлы инфракрасной съемки и фотофиксации. Моделированию и распознаванию подлежат ж/д объекты, четко определяемые по облаку точек лазерных отражений, и только внешние элементы конструкций, отображающие основной габарит.

В КСПД ИЖТ обрабатываются данные о следующих объектах/группах объектов:

- ось пути;
- рельсы по рабочей поверхности головки рельса;
- здания и другие наземные площадные объекты;
- металлические балки для подвеса проводов (консоли) контактной сети на опорах, конструкции натяжения проводов и т. п.;
- столбы опор контактной сети, фермовые конструкции, опоры линий электропередачи, столбы освещения;
- линейные объекты (контактные провода, кабели, тросы и т. д.);
- трубопроводы;
- математическая основа и информационные указатели (пункты ОГС, километровые столбы, пикетажные столбы, кабелеуказатели и т. п.);
- гидрография (реки, озера, ручьи и т. п.);
- дорожные сооружения;
- платформы, будки, семафоры, светофоры, шлагбаумы;
- площадное электрооборудование ж/д пути (подстанции, будки трансформаторные, трансформаторы, трансформатор на столбе, шкаф электрический распределительный);
- автодорожная сеть;
- растительность — объекты в виде TIN (triangulated irregular network) поверхности с шагом 50×50 см;
- ограждения (заборы, шумоподавляющие сооружения и т. п.).

Технологическая цепочка наиболее перспективного с точки зрения авторов мобильного лазерного сканирования разбивается на шесть отдельных этапов, которые достаточно независимы, так как операции могут быть распараллелены между отдельными исполнителями. Результат выполнения каждого этапа формализован.

На первом этапе решаются технические вопросы, призванные в первую очередь устранить ошибки сканирования и искажения пространственных данных. Одним из ключевых моментов данного этапа является создание топографо-геодезического обоснования путем расстановки и последующей «увязки» временных базовых станций, так как это является залогом качественного и точного определения требуемых пространственно-технических параметров объектов ж/д инфраструктуры. Малое число видимых навигационных спутников, неудовлетворительное их взаимное расположение (особенно в высоких широтах), плохие условия приема сигнала GPS-антенной под контактным проводом и другие обстоятельства могут стать существенным фактором снижения точности сканирования и даже привести к невыполнению работ.

Кроме этого стратегия достижения заданной плотности точек мобильного лазерного сканирования и обеспечения максимального съемочного покрытия состоит в проведении лазерного сканирования одного и того же участка железной дороги по первому и второму главному пути (по маршруту «туда и обратно»).

В подавляющем большинстве случаев такой метод обеспечивает и закрытие «мертвых» зон (особенности рельефа, ж/д составы, станционные здания и сооружения), и устранение локальных ошибок сканирования, возникающих при съемке по одному из направлений.

Основная задача следующего этапа, связанного с анализом результатов съемки и первичной обработкой данных мобильного лазерного сканирования, состоит в определении потенциально проблемных участков трассы или тех, где результаты сканирования неприемлемы для дальнейшей тематической обработки. Траекторное решение вычисляется с помощью программного обеспечения (ПО) Applanix POSPac MMS, в котором имеется возможность тонкой настройки прохождения сигнала через атмосферу (компенсации ионосферных и тропосферных задержек, вычисления релятивистского эффекта, учета ошибок синхронизации и др.). Данное ПО широко используется для вычисления точной траектории подвижных воздушных и наземных целей. Последующая первичная обработка производится специализированным ПО, поставляемым в комплекте со сканирующей системой. Отдельная задача, решаемая на этом этапе, — конвертирование данных в местную систему координат с соблюдением требований по секретности проведенных измерений.

На этапе классификации точек лазерного отражения и формирования цифровой модели земли происходит формирование проекта под последующую камеральную обработку. Вся трасса разбивается на блоки определенной длины, удобные для загрузки точек лазерного отражения и проведения трехмерной векторизации. Основная цель данного этапа заключается в отделении точек отражения от земли в отдельный класс, с тем чтобы можно было в дальнейшем определить такие параметры, как состояние балластной призмы, земляного полотна ж/д пути, водоотводных стоков.

Этап формирования трехмерных пространственных моделей, или трехмерного моделирования, — наиболее трудоемкий и «творческий», зависит от пространственного воображения оператора. Тем не менее процесс построения может быть формализован по двум направлениям: (1) существует достаточное количество программных продуктов, позволяющих по данным хорошего качества векторизовать линейные объекты типа рельсовой нити или электрических проводов; (2) использовать заранее созданные по конструкторским чертежам модели отдельных объектов ИЖТ (так называемые библиотечные примитивы), например опоры контактной сети, светофоры и другие устройства. Точность векторизации с использованием библиотечных примитивов на порядок выше; кроме этого под их расстановку разработано достаточное количество утилит, позволяющих делать это полуавтоматическим образом.

Суть следующего, пятого этапа заключается в добавлении семантической информации путем конвертирования созданной ранее трехмерной модели в ГБД и наполнении ее основной семантической информацией (атрибутирование).

Задача не тривиальна, поскольку полнотельные САД-объекты, как правило, представлены сложными внутренними структурами той программы, в которой

они создаются, и которые «рассыпаются» на простые элементы (типа линий и плоскостей) при экспорте их в любые ГИС-приложения. Для решения этой задачи применяется специальное ПО компании Safe Software, позволяющее проводить подобного рода операции.

Для атрибутирования используется фотоинформация, собираемая во время лазерного сканирования, а также «выгрузки» из специализированных баз геоданных. Помимо этого каждый объект, если он представлен в виде 3D- и точечного (или линейного) примитива, наделяется уникальным идентификатором для установления однозначной связи между условным схематическим знаком на топоплане и его трехмерным отображением.

На последнем, шестом этапе производится подготовка данных для работы функциональных приложений.

6 Заключение

В последние годы синтез информации из множества источников и баз данных в режиме реального времени приобретает все большее значение, поскольку имеет практическое значение во многих прикладных областях. Так как большинство датчиков могут генерировать большие объемы геоинформации в короткие промежутки времени, синтез данных, получаемых с использованием датчиков, требует новых методов оптимизации совместной обработки показаний датчиков. В работе рассмотрено формализованное представление технологической возможности получения геопространственных данных в рамках единой системы сбора геопространственной информации для автоматизации мониторинга ИЖТ в высокоточном координатном пространстве. В условиях повышающихся требований к доступности и оперативности геопространственной информации мобильное лазерное сканирование является наиболее эффективным решением современных технологий сбора и обработки геоданных для создания картографических материалов, паспортизации, мониторинга и фиксации состояния инфраструктурных транспортных объектов.

В процессе реализации проектов по проверке фактического положения объектов ж/д инфраструктуры была разработана и апробирована уникальная сквозная технология съемки и обработки пространственных данных, позволяющая, с одной стороны, минимизировать затраты на обработку, а с другой — повысить контролируемость процесса и точность синтеза геоданных.

Литература

1. *Dasarathy B.* Information fusion — what, where, why, when, and how? // Inform. Fusion, 2001. Vol. 2. No. 2. P. 75–76.
2. *Madhavan J., Bernstein P., Rahm E.* Generic schema matching with cupid // 27th Conference (International) on Very Large Data Bases Proceedings / Eds. P. Apers, P. Atzeni, S. Ceri, S. Paraboschi, K. Ramamohanarao, R. Snodgrass. — Roma, Italy, 2001. P. 49–58

3. Дулин С. К., Дулина Н. Г., Никишин Д. А. Проблемы обеспечения семантической геointероперабельности и согласования понимания семантики геоданных // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 1. С. 86–108.
4. Duckham M., Worboys M. Automated geographic information fusion and ontology alignment // Spatial data on the Web: Modelling and management / Eds. A. Belussi, V. Catania, E. Clementini, E. Ferrari. — Berlin: Springer, 2007. P. 109–132.
5. Дулин С. К., Дулина Н. Г., Якушев Д. А. Адаптивная идентификация пространственных объектов в информационно-измерительной системе мобильного лазерного сканирования // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2016. Т. 14. № 8. С. 26–35.
6. Уманский В. И., Дулин С. К., Якушев Д. А. Автоматизированные дистанционные методы распознавания протяженных инфраструктурных объектов системой мобильного лазерного сканирования // Тр. 5-й научн.-технич. конф. с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование». — М.: НИИАС, 2016. С. 176–179.
7. Семерий О. С. Распознавание геометрических объектов с помощью функций расстояния // Распознавание образов и анализ изображений: Сб. тр. междунар. конф. — В. Новгород, 2002. С. 486–490.
8. Shi-Kuo C., Costagliola G., Jungert E. Multi-sensor information fusion by query refinement // Recent advances in visual information systems / Eds. S. K. Chang, Z. Chen, S. Y. Lee. — Lecture notes in computer science ser. — Berlin–Heidelberg: Springer, 2002. 2314:1–11.
9. Гуляев Ю. В., Журавлев Е. Е., Олейников А. Я. Методология стандартизации для обеспечения интероперабельности информационных систем широкого класса // Ж. радиоэлектроники, 2012. № 3. 40 с. <http://jre.cplire.ru/iso/mar12/2/text.pdf>.

Поступила в редакцию 30.05.17

GEOINFORMATION FUSION OF SPATIAL DATA OF THE RAILWAY TRANSPORT INFRASTRUCTURE

S. K. Dulin¹, N. G. Dulina², and D. A. Yakushev³

¹Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

²A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

³Research and Design Institute for Information Technology, Signalling, and Telecommunications on Railway Transport, 27-1 Nizhegorodskaya Str., Moscow 119029, Russian Federation

Abstract: The paper considers a formalized representation of the technological possibility of obtaining geospatial data within the framework of a single system

for collecting geospatial information to automate the monitoring of the state of the railway transport infrastructure in high-precision coordinate space. In the face of increasing demands on the availability and efficiency of geospatial information, mobile laser scanning is the most effective solution for modern geodata collection and processing for the creation of cartographic materials, certification, monitoring, and fixing the state of infrastructure transport facilities. In the process of realizing projects to verify the actual location of the railway facilities infrastructure, the authors have developed and tested a unique end-to-end technology for surveying and processing spatial data, which, on the one hand, minimizes processing costs, and, on the other hand, increases the process control and accuracy of geodata base synthesis.

Keywords: monitoring of railway transport infrastructure; geospatial information; mobile laser scanning

DOI: 10.14357/08696527170311

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 17-20-02153 ofi_m-RZhD).

References

1. Dasarathy, B. 2001. Information fusion — what, where, why, when, and how? *Inform. Fusion* 2(2):75–76.
2. Madhavan, J., P. Bernstein, and E. Rahm. 2001. Generic schema matching with cupid. *20th Conference (International) on Very Large Data Bases Proceedings*. Eds. P. Apers, P. Atzeni, S. Ceri, S. Paraboschi, K. Ramamohanarao, and R. Snodgrass. Roma, Italy. 49–58.
3. Dulin, S. K., N. G. Dulina, and D. A. Nikishin. 2016. Problemy obespecheniya semanticheskoy geointeroperabel'nosti i soglasovaniya ponimaniya semantiki geodannykh [The problems of ensuring semantic geointeroperability and harmonizing understanding of the geodata semantics]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(1):86–108.
4. Duckham, M. and M. Worboys. 2007. Automated geographic information fusion and ontology alignment. *Spatial data on the Web: Modelling and management*. Eds. A. Belussi, B. Catania, E. Clementini, and E. Ferrari. Berlin: Springer. 109–132.
5. Dulin, S. K., N. G. Dulina, and D. A. Yakushev. 2016. Adaptivnaya identifikatsiya prostranstvennykh ob"ektov v informatsionno-izmeritel'noy sisteme mobil'nogo lazernogo skanirovaniya [Adaptive identification of spatial objects in the information-measuring system of mobile laser scanning]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-Measuring and Control Systems] 14(8):26–35.
6. Umanskiy, V. I., S. K. Dulin, and D. A. Yakushev. 2016. Avtomatizirovannye distantsionnye metody raspoznavaniya protyazhennykh infrastrukturykh ob"ektov sistemy mobil'nogo lazernogo skanirovaniya [Automated remote methods of recognition of extended infrastructure objects by a mobile laser scanning system]. *Tr. 5-y nauchn.-tekhnich. konf. s mezhdunar. uchastiem "Intellektual'nye sistemy upravleniya na*

- zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie*" [5th Scientific and Technical Conference with International Participation "Intelligent Control Systems in Railway Transport. Computer and Mathematical Modeling Proceedings]. Moscow: NIIAS. 176–179.
7. Semeriy, O. S. 2002. Raspoznavanie geometricheskikh ob"ektov s pomoshch'yu funktsiy rasstoyaniya [Recognition of geometric objects using distance functions]. *Conference (International) "Image Recognition and Image Analysis" Proceedings*. Velikiy Novgorod. 486–490.
 8. Shi-Kuo, C., G. Costagliola, and E. Jungert. 2002. Multi-sensor information fusion by query refinement. *Recent advances in visual information systems*. Eds. S. K. Chang, Z. Chen, and S. Y. Lee. Lecture notes in computer science ser. Berlin–Heidelberg: Springer. 2314:1–11.
 9. Gulyaev, Yu. V., E. E. Zhuravlev, and A. Ya. Oleynikov. 2012. Metodologiya standartizatsii dlya obespecheniya interoperabel'nosti informatsionnykh sistem shirokogo klassa [Methodology of standardization for ensuring interoperability of information systems of a wide class]. *Zh. radioelektroniki* [J. Radioelectronics] 3. Available at: <http://jre.cplire.ru/iso/mar12/2/text.pdf> (accessed August 17, 2017).

Received May 30, 2017

Contributors

Dulin Sergey K. (b. 1950) — Doctor of Science in technology, professor; leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; s.dulin@ccas.ru

Dulina Natalia G. (b. 1947) — Candidate of Science in technology, senior scientist, A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; ngdulina@mail.ru

Yakushev Dmitry A. (b. 1965) — Candidate of Science in technology, Head of Department, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, 27-1 Nizhegorodskaya Str., Moscow 119029, Russian Federation; yakush.d@gmail.com

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

О. Г. Кантор¹, С. И. Спивак², Р. Р. Талипова³

Аннотация: Исследуется задача параметрической идентификации кинетических уравнений сложных химических реакций с дробной подачей веществ, сводящихся к системам автономных дифференциальных уравнений с особыми точками. Неизвестными в идентифицируемых моделях выступают константы скоростей химических реакций. Методологическую основу разработанного метода параметрической идентификации, основанного на использовании предельно допустимых оценок параметров моделей, составляют идеи равномерного приближения экспериментальных данных и подхода Л. В. Канторовича к выявлению областей расположения искомым и наблюдаемым величин. Представленное математическое и алгоритмическое обеспечение позволяет учитывать априорную информацию о значениях искомым параметров, специфику исследуемых реакций (включая ограниченный объем опытных данных), а также требования, предъявляемые к качественным характеристикам кинетических моделей. На примере реальных опытных данных приведены результаты апробации метода.

Ключевые слова: параметрическая идентификация; уравнения химической кинетики; интервалы неопределенности; область неопределенности

DOI: 10.14357/08696527170312

1 Введение

Общий вид кинетической модели, выписанной для химической реакции с участием двух веществ, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{da_1}{dt} &= w_1^+ - w_1^- = k_1^+ a_1^{n_{11}^+} a_2^{n_{12}^+} - k_1^- a_1^{n_{11}^-} a_2^{n_{12}^-}; \\ \frac{da_2}{dt} &= w_2^+ - w_2^- = k_2^+ a_1^{n_{21}^+} a_2^{n_{22}^+} - k_2^- a_1^{n_{21}^-} a_2^{n_{22}^-}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь a_i — концентрации веществ; w_i^* — скорости i -й химической реакции; k_i^* — константы скоростей i -й химической реакции; n_{ij}^* — целые неотрицательные числа, называемые порядком i -й химической реакции по j -му веществу, $i, j = \overline{1, 2}$. Знаком «+» обозначены элементы первых слагаемых уравнений, которые

¹Институт социально-экономических исследований Уфимского научного центра Российской академии наук, o.kantor@mail.ru

²Башкирский государственный университет, semen.spivak@mail.ru

³Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук, г. Уфа, talipova.regina@inbox.ru

характеризуют скорость образования i -го вещества, а знаком « $-$ » — элементы вторых слагаемых, характеризующих скорость его расходования.

Кинетические уравнения (1) относятся к классу моделей, описываемых системами автономных дифференциальных уравнений. В качестве их параметров выступают константы скоростей и порядки химической реакции. В случае известного механизма протекания реакции порядки химической реакции n_{ij}^* определяются однозначно и подлежащими определению в модели остаются только константы скоростей химических реакций.

Спецификация кинетических моделей, как правило, не позволяет осуществлять аналитическое решение, в силу чего определение их точного вида необходимо осуществлять с использованием численных методов. Важными особенностями задач химической кинетики являются неотрицательность констант скоростей k_i^* и априорная неточность данных, источниками которой могут выступать как ошибки, возникающие по результатам измерений, осуществляемых в ходе экспериментов, так и ошибки, появляющиеся при непосредственной обработке данных.

Дополнительную сложность при идентификации модели (1) могут вносить специфические режимы проведения реакций. К числу таковых относится режим дробной подачи, под которой понимается порционное введение некоторых веществ в определенные моменты времени. Использование дробных режимов подачи веществ обусловлено их влиянием на эффективность реакции. В частности, эффект может проявляться в сокращении расхода катализатора или окислителя [1, 2].

Наличие дробного режима подачи веществ приводит к тому, что соответствующие зависимости концентраций от времени являются разрывными функциями. А это означает, что система дифференциальных уравнений (1) будет иметь особые точки. В контексте сказанного актуальность приобретает разработка специфических методов параметрической идентификации математических моделей химической кинетики.

В настоящей работе предложен метод параметрической идентификации кинетических моделей реакций с дробной подачей веществ, основанный на использовании принципа равномерного приближения экспериментальных данных и подходе Л. В. Канторовича к выявлению областей расположения искомым и наблюдаемым величин [3]. Осуществлена апробация метода на примере реакции получения 4-трет-бутилпирокатехина (4-ТБПК) при помощи селективного окисления 4-трет-бутилфенола (4-ТБК) растворами пероксида водорода в присутствии титаносиликатных катализаторов [2].

2 Концептуальный подход к решению задач параметрической идентификации кинетических моделей

Пусть $a_i^{\text{экс}}|_t$ и $a_i^{\text{расч}}|_t$ ($t = \overline{1, m}$, $i = 1, 2$) — значения концентраций, полученные экспериментально и рассчитанные на основе модели (1) соответственно.

Тогда соответствующие невязки будут определяться выражением $a_i^{\text{эксп}}|_t - a_i^{\text{расч}}|_t$. Абсолютное соответствие расчетных и экспериментальных данных, как правило, не является обязательным, и в большей степени исследователя интересует выполнение приемлемой точности модели.

Суть равномерного приближения экспериментальных данных заключается в том, чтобы подобрать параметры модели (1), обеспечивающие справедливость равенств

$$|a_i^{\text{эксп}}|_t - a_i^{\text{расч}}|_t| \leq \xi, \quad t = \overline{1, m}, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

где $\xi \geq 0$ — абсолютная погрешность.

Чем меньше величина ξ , тем, очевидно, более точной является модель (1). С этих позиций задача определения минимального значения ξ (далее — предельной абсолютной погрешности ξ^*) примет вид:

$$\begin{aligned} \xi &\rightarrow \min, \\ |a_i^{\text{эксп}}|_t - a_i^{\text{расч}}|_t| &\leq \xi, \quad t = \overline{1, m}, \quad i = 1, 2, \\ k_1 &\geq 0, \quad k_2 \geq 0, \quad \xi \geq 0. \end{aligned}$$

Погрешность ξ^* может принимать свое значение на некотором множестве значений констант скоростей, что обуславливает актуальность задачи определения границ такого множества. В общем случае такая задача не может быть решена аналитически и требует использования специальных методов моделирования и численных алгоритмов.

Интерес в контексте определения границ множества значений параметров идентифицируемой зависимости, обеспечивающих получение предельной абсолютной погрешности, представляет подход, основоположником которого является выдающийся ученый Л. В. Канторович, впервые высказавший в своей работе [3] идеи получения точных двусторонних границ для параметров моделей и областей расположения искомым и наблюдаемых величин. Согласно подходу Л. В. Канторовича выполнение условий (2) означает, что модель (1) описывает наблюдения в пределах, обусловленных величиной предельно допустимой погрешности измерений ξ . Описывая свой подход к обработке наблюдений, Л. В. Канторович считал, что исследователь должен располагать информацией о величине ξ , например на основании технических характеристик используемых приборов. Однако не для всех задач такая информация является доступной [4].

В целях формализации подхода Л. В. Канторовича определим по каждой из констант скоростей интервал неопределенности как некоторый отрезок $[k_i^{\min}, k_i^{\max}]$, вариация внутри которого сохраняет совместность системы неравенств (2). Будем называть эти отрезки интервалами неопределенностей, их прямое произведение $[k_1^{\min}, k_1^{\max}] \times [k_2^{\min}, k_2^{\max}]$ — областью неопределенностей и поставим задачу определения границ интервалов неопределенностей по каждой из констант, для обозначения которых будем использовать термин *предельно допустимые оценки*.

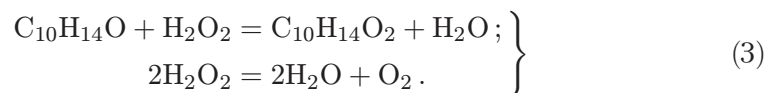
Расчет предельно допустимых оценок будем осуществлять на основе моделей следующего вида [4, 5]:

$$k_i \rightarrow \min(\max), \quad i = 1, 2, \quad k_1 \geq 0, \quad k_2 \geq 0, \\ |a_i^{\text{эксп}}|_t - a_i^{\text{расч}}|_t| \leq \xi^*, \quad t = \overline{1, m}, \quad i = 1, 2.$$

Знание интервалов неопределенностей предоставляет исследователю возможность для проведения численных экспериментов, направленных на анализ качественных характеристик зависимостей (1) и уточнение границ множества значений констант скоростей, обеспечивающих их оптимальные величины.

3 Апробация метода

Исследованный процесс получения 4-ТБПК является сложной химической реакцией, стехиометрические уравнения которой имеют следующий вид:



Исходя из уравнений (3), выписываются кинетические уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{da_1}{dt} &= -k_1 a_1 a_2; \\ \frac{da_2}{dt} &= -k_1 a_1 a_2 - 2k_2 a_2^2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где a_1 — концентрация 4-ТБФ; a_2 — концентрация пероксида водорода; k_1 и k_2 — константы скоростей 1-й и 2-й химических реакций соответственно.

Реакция исследовалась в условиях дробной подачи окислителя, организованной следующим образом: пероксид водорода вводился в раствор с момента начала реакции трижды с интервалом в 20 мин по 0,08 моль/л (см. таблицу¹). Продолжительность наблюдений составляла 1 ч.

Идентификация модели (4) осуществлялась в условиях малого числа наблюдений (не считая начальных, таких наблюдений всего по три в каждом опыте) и при отсутствии предварительной информации о диапазонах значений констант k_1 и k_2 .

Для идентификации модели (4) была разработана вычислительная процедура (рис. 1), по результатам выполнения которой формировалось информационное множество, состоящее из:

¹ Данные получены в лаборатории приготовления катализаторов Института нефтехимии и катализа Российской академии наук.

Экспериментальные реакции получения 4-ТБПК

№ опыта	t, мин	Молярные концентрации, моль/л		
		4-ТБФ	Пероксид водорода	4-ТБПК
1	0	0,12	0,08	0
	20	0,086	0,0200 / 0,1000	0,017
	40	0,078	0,0232 / 0,1032	0,024
	60	0,074	0,0248	0,027
2	0	0,12	0,08	0
	20	0,089	0,0216 / 0,1016	0,016
	40	0,082	0,0248 / 0,1048	0,022
	60	0,077	0,0280	0,025
3	0	0,12	0,08	0
	20	0,086	0,0208 / 0,1008	0,017
	40	0,080	0,0248 / 0,1048	0,022
	60	0,077	0,0272	0,025
Среднее по трем опытам	0	0,12	0,08	0
	20	0,087	0,0208 / 0,1008	0,017
	40	0,080	0,0243 / 0,1043	0,023
	60	0,076	0,0267	0,026

Примечание: жирным шрифтом выделены концентрации пероксида водорода по окончании процедуры дробной подачи.

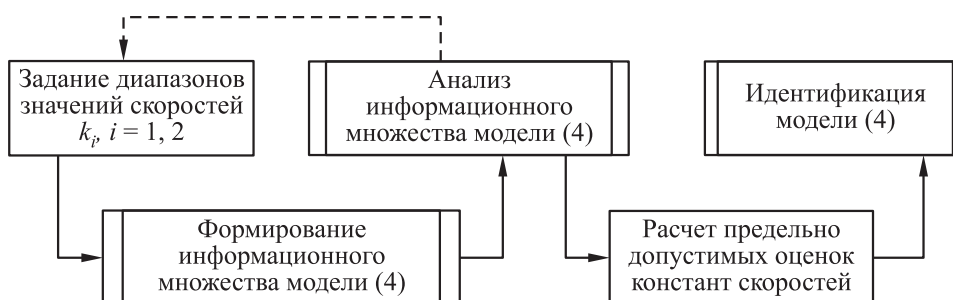


Рис. 1 Схема идентификации модели (4)

- наборов значений констант скоростей химических реакций k_1 и k_2 ;
- расчетных значений концентраций $a_1^{\text{расч}}|_t$ и $a_2^{\text{расч}}|_t$ в моменты времени $t = 20, 40, 60$;
- значений качественных характеристик.

В качестве исходных данных были приняты средние значения молярных концентраций по совокупности представленных опытов (см. таблицу). Диапазоны значений констант $[k_i^{\min}, k_i^{\max}]$, $i = 1, 2$, на первой итерации задавались произвольно. В дальнейшем проводилась их корректировка.

Критерий качества модели (4) был сформирован из двух компонент:

- (1) первая выражалась средними погрешностями аппроксимации по каждому кинетическому уравнению:

$$\bar{A}_i = \frac{1}{3} \sum_{t=20,40,60} \left| \frac{a_i^{\text{расч}}|_t - a_i^{\text{эксп}}|_t}{a_i^{\text{эксп}}|_t} \right| \cdot 100\%, \quad i = 1, 2; \quad (5)$$

- (2) вторая — модулем вектора средних погрешностей аппроксимации:

$$\sqrt{(\bar{A}_1)^2 + (\bar{A}_2)^2}. \quad (6)$$

Очевидно, что чем меньше значение критериев (5) и (6), тем более точным следует считать полученные расчетные значения и тем предпочтительнее соответствующий набор значений констант k_1 и k_2 . Предельно допустимые оценки для k_1 и k_2 рассчитывались на основе минимальных и максимальных значений соответствующих констант, обеспечивающих заданные уровни точности аппроксимации экспериментальных данных. (Набор значений констант считался отвечающим качественным требованиям, если средние погрешности аппроксимации по каждому уравнению не превышали заданных пороговых значений \bar{A}_1^* и \bar{A}_2^* .) На их основе формировались интервалы неопределенностей, область неопределенности модели (4) и уточнялись границы множества значений констант скоростей, обеспечивающих оптимальные значения критерия (5).

Идентификация модели (4) завершалась выбором набора k_1^* и k_2^* из полученной области оптимальных значений констант скоростей в соответствии с минимальным значением критерия (6) или в соответствии с предпочтениями исследователя в том случае, если минимум критерия (6) достигался не на единственном наборе значений констант скоростей реакции k_1 и k_2 .

4 Обсуждение результатов

Непосредственные расчеты проводились с помощью программы, написанной на языке Java.

В качестве метода численного решения системы (4) был выбран метод Рунге–Кутты 4-го порядка. Если расчетные значения $a_1^{\text{расч}}|_t$ и $a_2^{\text{расч}}|_t$ в любой момент времени оказывались отрицательными, то соответствующий элемент информационного множества не формировался.

Была проведена серия численных экспериментов, отличающихся интервалами задания начальных диапазонов вариации констант скоростей. На последней итерации было получено:

$$[k_1^{\min}, k_1^{\max}] = [0,13, 0,27] ; \quad [k_2^{\min}, k_2^{\max}] = [0,42, 0,70] .$$

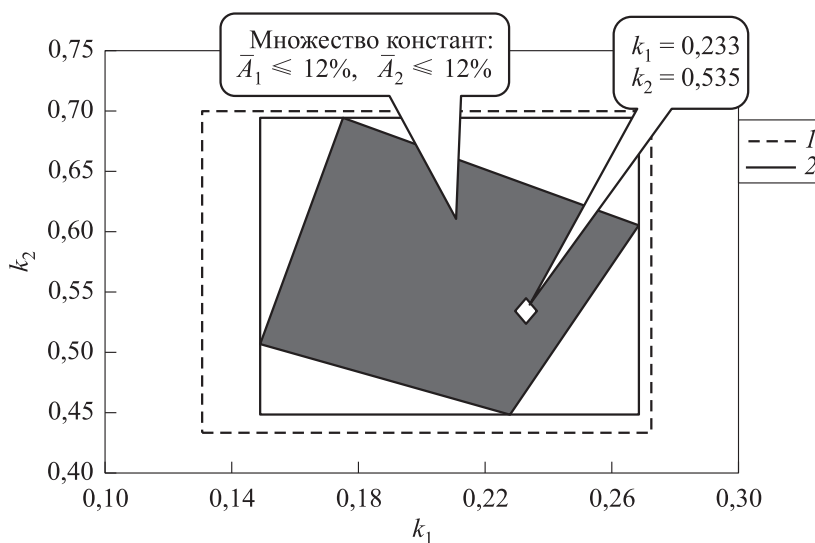


Рис. 2 Графическая интерпретация результатов идентификации модели (4): 1 — границы начального приближения; 2 — границы множества неопределенностей

Каждый из приведенных интервалов значений разбивался на 1000 равных отрезков, границы которых и формировали дискретную сетку значений констант k_1 и k_2 . Уровень пороговых значений для средних погрешностей аппроксимации был определен в 12%.

По результатам расчетов было сформировано информационное множество, состоящее из 10 201 набора. Количество наборов значений констант, для которых $\bar{A}_1 \leq 12\%$ и $\bar{A}_2 \leq 12\%$, составило 4 286. Именно эти наборы обеспечили выполнение первой компоненты критерия качества. На основании их анализа были рассчитаны предельно допустимые оценки констант k_1 и k_2 , которые позволили сформировать соответствующие интервалы неопределенностей ($k_1 \in [0,151, 0,267]$, $k_2 \in [0,451, 0,689]$), построить множество неопределенностей и множество констант, обеспечивающих заданный уровень точности аппроксимации по каждому уравнению модели (4) (рис. 2).

Значения средних погрешностей аппроксимации на множестве значений констант, обеспечивающих заданный уровень критерия (5), варьировались в следующих диапазонах:

$$\bar{A}_1 \in [10,25, 12,00]; \quad \bar{A}_2 \in [0,63, 11,99].$$

Минимальное значение критерия (6) — второй компоненты критерия качества — составило 10,42% (при $\bar{A}_1 = 10,39\%$ и $\bar{A}_2 = 0,87\%$). Ему соответствовал единственный элемент информационного множества со следующими значениями

констант скоростей: $k_1^* = 0,233$; $k_2^* = 0,535$. Именно эти значения определили точный вид кинетической модели (4).

5 Заключение

В развитие подхода Л. В. Канторовича к определению областей расположения искомых величин разработан метод параметрической идентификации кинетических моделей сложных химических реакций. Его применение обеспечивает определение множества значений констант скоростей реакции, гарантирующих достижение заданных качественных характеристик математического описания опытных данных.

Приведены результаты апробации метода при построении кинетической модели реакции получения 4-ТБПК в условиях дробной подачи окислителя. Для каждой из оцениваемых констант скоростей химической реакции были рассчитаны интервалы неопределенностей, на основании исследования которых при помощи специально организованного вычислительного эксперимента был определен точный вид кинетической модели. Построенная модель характеризуется высокой точностью описания опытных данных: средняя погрешность аппроксимации составила 10,4% по первому уравнению и 0,9% — по второму.

Полученные результаты могут составить основу для дальнейших численных экспериментов, например, имеющих целью определение оптимального режима подачи окислителя, обеспечивающего максимум выхода результирующего продукта.

Литература

1. Желовицкая А. В., Ермолаева Е. А., Дресвянников А. Ф. Окисление органических соединений с помощью гидроксид-радикала, генерируемого в растворах химическим и электрохимическими методами // Вестник Казанского технологического университета, 2008. № 6. С. 211–229.
2. Talipova R. R., Kharrasov R. U., Agliullin M. R., Badikova A. D., Kutepov B. I. Selective oxidation of 4-tert-butylphenol by hydrogen peroxide in the presence of titanosilicates // Appl. Petrochem. Res., 2016. № 6. P. 419–426. doi: 10.1007/s13203-016-0169-7.
3. Канторович Л. В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // Сиб. мат. ж., 1962. Т. 3. № 5. С. 701–709.
4. Спивак С. И., Кантор О. Г. Качество моделей математической обработки наблюдений социально-экономических систем // Системы управления и информационные технологии, 2012. Т. 48. № 2. С. 44–49.
5. Спивак С. И., Исмаилова А. С., Кантор О. Г. Области неопределенности в математической теории анализа измерений // Системы управления и информационные технологии, 2014. Т. 58. № 4. С. 17–21.

Поступила в редакцию 17.03.17

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF MATHEMATICAL MODELS OF CHEMICAL KINETICS

O. G. Kantor¹, S. I. Spivak², and R. R. Talipova³

¹Institute of Social and Economic Research, Ufa Research Center, Russian Academy of Sciences, 71 Oktyabrya Ave., Ufa 450054, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

²Bashkir State University, 32 Zaki Validi Str., Ufa 450076, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

³Institute of Petrochemistry and Catalysis, Russian Academy of Sciences, 141 Oktyabrya Ave., Ufa 450075, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

Abstract: The problem of parametric identification of the complex chemical reactions' kinetic equations with fractional delivery of substances is investigated. Such equations are reduced to systems of autonomous differential equations with singular points. The constants of chemical reactions in the identifiable models are unknown. The description of the developed parametric identification method is given. It is based on the use of the maximum permissible estimates of model parameters. The idea of the uniform approximation of experimental data and the approach of L. V. Kantorovich to the identification of sets of location of the sought and observed quantities form the methodological basis of the parametric identification method. The presented mathematical and algorithmic support allows taking into account *a priori* information about the values of the sought parameters, the specificity of the investigated reactions, and the requirements for qualitative characteristics of the kinetic models. The results of approbation of the method are presented by an example of real experimental data.

Keywords: parametric identification; chemical kinetics' equations; uncertainty intervals; uncertainty set

DOI: 10.14357/08696527170312

References

1. Zhelovitskaya, A. V., E. A. Ermolaeva, and A. F. Dresvyannikov. 2008. Okislenie organicheskikh soedineniy s pomoshch'yu gidroksid-radikala, generiruemogo v rastvorakh khimicheskimi i elektrokhimicheskimi metodami [Oxidation of organic compounds with hydroxide radical generated in solutions by chemical and electrochemical methods]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University] 6:211–229.
2. Talipova, R. R., R. U. Kharrasov, M. R. Agliullin, A. D. Badikova, and B. I. Kutepov. 2016. Selective oxidation of 4-tert-butylphenol by hydrogen peroxide in the presence of titanosilicates. *Appl. Petrochem. Res.* 6:419–426. doi: 10.1007/s13203-016-0169-7.
3. Kantorovich, L. V. 1962. O nekotorykh novykh podkhodakh k vychislitel'nym metodam i obrabotke nablyudeniy [On some new approaches to computational methods and processing of observations]. *Sib. mat. zh.* [Sib. Math. J.] 5(3):701–709.

4. Spivak, S. I., and O. G. Kantor. 2012. Kachestvo modeley matematicheskoy obrabotki nablyudeniy sotsial'no-ekonomicheskikh sistem [Quality of mathematical processing observations models of socio-economic systems]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Automat. Rem. Contr.] 2(48):44–49.
5. Spivak, S. I., A. S. Ismagilova, and O. G. Kantor. 2014. Oblasti neopredelennosti v matematicheskoy teorii analiza izmereniy [Uncertainty sets in the mathematical theory of measurement analysis]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Automat. Rem. Contr.] 4(58):17–21.

Received March 17, 2017

Contributors

Kantor Olga G. (b. 1971) — Candidate of Science in physics and mathematics, associate professor, senior scientist, Institute of Social and Economic Research, Ufa Research Center, Russian Academy of Sciences, 71 Av. Oktyabrya, Ufa 450054, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; o_kantor@mail.ru

Spivak Semen I. (b. 1945) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Head of Department, Bashkir State University, 32 Validy Str., Ufa 450076, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, semen.spivak@mail.ru

Talipova Regina R. (b. 1979) — Candidate of Science in chemistry, scientist, Institute of Petrochemistry and Catalysis, Russian Academy of Sciences, 141 Oktyabr Ave., Ufa 450075, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; talipova.regina@inbox.ru

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ И АЛЮМИНИЯ

М. Р. Еникеев¹, И. М. Губайдуллин², М. А. Малеева³

Аннотация: Работа посвящена проблеме идентификации коррозии и количественной оценке коррозионного повреждения, которая имеет важное значение в машиностроении, строительстве, нефтедобывающей отрасли. Цель работы — разработка информационно-вычислительной аналитической системы (ИВАС) для оценивания и прогнозирования коррозионных процессов на поверхности стали и алюминия. Работа данной системы рассматривается на примере обработки данных процесса коррозии алюминия и коррозионного растрескивания стали. Результаты работы могут быть использованы для исследования коррозионных процессов на поверхности металла с целью установления закономерности между состоянием поверхности и физико-химическим воздействием на нее.

Ключевые слова: информационно-вычислительная аналитическая система; коррозия металлов; компьютерное зрение

DOI: 10.14357/08696527170313

1 Введение

Коррозионное разрушение металла — одна из существенных причин снижения долговечности и потери работоспособности металлических конструкций. Более всего от коррозии страдают железо и его сплавы, а также алюминий. Металлические конструкции подвержены, в основном, электрохимической коррозии, возникающей при соприкосновении металлов с электролитами. Выявление повреждений на ранних стадиях или предпосылок к ним (*диагностика*), а также предвидение их развития (*прогнозирование*) позволяют правильно оценивать

¹Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук, г. Уфа, enikeev.marat.rus@gmail.com

²Уфимский государственный нефтяной технический университет; Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук, г. Уфа, irekmars@mail.ru

³Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук, marina.maleeva@gmail.com

условия эксплуатации аппаратов, машин и оборудования, определять эффективность применения методов и средств защиты, а также принимать решение об их совершенствовании.

Лаборатория коррозии металлов в природных условиях Института физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук специализируется на изучении коррозии различных металлов в естественных средах. Имеется огромный опыт в исследовании механизма локальной и равномерной коррозии металлов с использованием математических и статистических методов для описания сложных процессов.

Методы исследования по способу оценки коррозии металлов подразделяются на количественные и качественные. Существенным недостатком количественных подходов является относительная трудоемкость проведения анализа и невозможность применить эти методы вне лабораторных условий. Качественные методы испытания не дают полной характеристики стойкости металлов, зато позволяют установить интенсивность коррозионного процесса и его характер. К качественным методам относятся визуальные наблюдения внешнего вида образца металла и наблюдения за изменениями в растворе. При всех преимуществах визуальных методов все они имеют существенный недостаток — трудность в наблюдении и описании изменений интересующего образца металла в коррозионном растворе.

При оценке коррозии по фотографии наибольшее распространение получил так называемый метод сеток. Метод заключается в визуальном определении вида коррозионных поражений образцов с последующим измерением площади, занятой этими поражениями. Однако, используя метод сеток, трудно описать сложную и нерегулярную структуру, например коррозионной трещины. Одним из эффективных путей решения данной проблемы является использование фракталов, которые впервые были предложены Мандельбротом в 1982 г. [1]. Большая часть работ, связанных с обнаружением коррозионных эффектов, основанных на методах компьютерного зрения, анализирует трещины и в некоторой степени питтинги. Многие из этих изысканий успешно решили задачу автоматизации обнаружения и измерения дефектов. Больше исследований должно быть проведено, чтобы улучшить методы, используемые для автоматической оценки, поскольку они в настоящее время основаны на нескольких предположениях. Например, используя методы фрактальной геометрии или любые другие для анализа коррозионного процесса [2], исследователи не учитывают тот факт, что для эффективного применения методов анализа само изображение предварительно нуждается в обработке для подавления помех. Абдель-Кэдер с соавт. [3] сравнили различные алгоритмы обнаружения границ и выявили, что наиболее эффективным для обнаружения трещин является метод Хаара. Однако на зашумленных данных этот метод, скорее всего, окажется неэффективным, так же как и методы, основанные на морфологических операциях [4]. В работе [5] используется метод главных компонент для поиска трещин на поверхности моста. В этом случае точность анализа зависит от положения камеры. Прасанна с соавт. [6] использовали метод анализа гистограмм и SVM (support vector machine) для проведения операции

классификации с целью обнаружения трещины. Результаты работы алгоритма на реальных данных указали на необходимость увеличения точности обнаружения трещины. Тем не менее, если бы обучение классификатора происходило на более разнородных данных, это позволило бы повысить точность обнаружения. Латтанзи и Миллер [7] разработали метод кластеризации, основанный на методе К-средних и детекторе границ Кэнни. Одним из первых опытов использования компьютерного зрения для исследования коррозии металлов является изучение точечной коррозии нержавеющей стали в растворе $FeCl_3$ [8]. Эксперимент проводился следующим образом: по фотографиям процесса коррозии определялось отношение площади коррозионных ямок к общей площади изображения. Заслуживает внимание изучение коррозии как трехмерного объекта, т. е. определение глубины и формы ямки методами компьютерного зрения [9]. В работе [10] представлен другой метод идентификации коррозионного разрушения металла по минимуму расстояния между объектами распознавания.

Разработка математической модели, позволяющей количественно описывать процессы на межфазных границах в широком ряду испытательных сред и металлов и основанной на обработке изображений прокорродировавшей поверхности, даст возможность более полного использования методов визуального контроля и более глубокого понимания механизмов реакций на межфазных границах. Системой, реализующей такую модель, может служить система компьютерного зрения.

Исследование коррозионных процессов методами компьютерного зрения предполагает четыре взаимосвязанных процесса, которые создают предпосылки для создания ИВАС:

1. Накопление экспериментальных данных (изображения прокорродировавшей поверхности), которые требуют упорядочения, структурирования и классификации для корректного использования при решении задачи обучения классификатора.
2. Разработка способов обработки информации в зависимости от типа решаемой задачи. В данном случае это использование методов обработки изображения, математической статистики и фрактального анализа для оценивания и прогнозирования коррозионных процессов для различных типов металлов (стали, железа и алюминия).
3. Обновление технических средств обработки информации, увеличение скорости вычисления (за счет использования графических процессоров).
4. Внедрение автоматических систем научного исследования в виде комплекса программных пакетов и обучение конечного пользователя (исследователя).

В данной статье представлена ИВАС оценивания и прогнозирования коррозионных поражений (КорОценка). Перечислены основные результаты, сделанные на основе использования ИВАС.

2 Объект исследования

2.1 Коррозия алюминия с водородной деполяризацией

На рис. 1 представлено изображение поверхности алюминия при коррозии в 0,1 М NaCl (рН 11). Процесс сопровождается интенсивным выделением водорода. На изображении видны пузырьки выделяющегося водорода.

Задача поиска объектов на изображении заключалась в обнаружении пузырьков выделяемого водорода, а по серии снимков необходимо было определить кинетику его выделения. По объему выделившегося водорода оценивается скорость катодной реакции, которая равна скорости анодной, а значит, скорости растворения или коррозии.

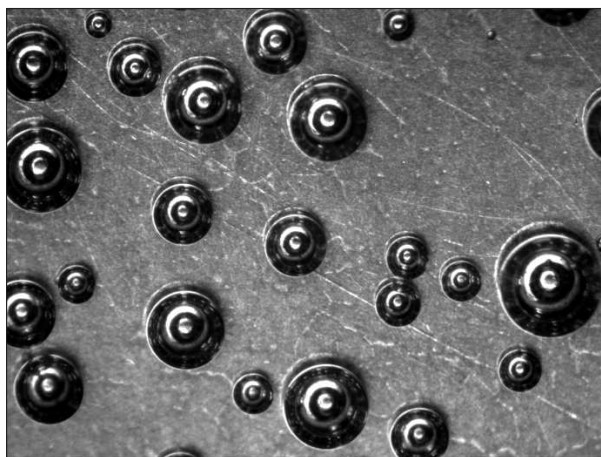


Рис. 1 Изображение поверхности алюминия при потенциале коррозии в 0,1 М NaCl (рН 11)

2.2 Коррозионное растрескивание стали

Оценка коррозионного растрескивания под напряжением состояла в анализе входных данных в виде изображений трубной стали X70 в различных растворах (рис. 2). В качестве критерия оценки трещины на образце стали использовалась фрактальная размерность.

Целью обработки серии изображений был поиск взаимосвязи между структурными изменениями трещины с химическим и механическим воздействием на нее.



Рис. 2 Примеры входных данных для трубной стали X70



Рис. 3 Структура ИВАС КорОценка

3 Структура информационно-вычислительной аналитической системы КорОценка

Структура ИВАС включает четыре основные части (рис. 3):

- (1) входные информационные потоки;
- (2) выходные информационные потоки;
- (3) методы обработки изображений;
- (4) технические средства обработки информации.

Входные и выходные информационные потоки образуют единую реляционную базу данных. Выбор реляционной модели базы данных диктуется тем, что входные и выходные данные представляются в виде матриц.

4 Применение информационно-вычислительной аналитической системы КорОценка к исследованию механизма коррозионных реакций

Используемыми методами обработки информации при исследовании коррозионных реакций в ИВАС являются методы обработки изображения, фрактальный анализ, контурный анализ, поиск объекта по шаблону.

В первую очередь математическая обработка экспериментальных данных заключается в работе с изображением f , которое является матрицей $f(M, N)$:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \dots & f(0, N - 1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \dots & f(1, N - 1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M - 1, 0) & f(M - 1, 1) & \dots & f(M - 1, N - 1) \end{bmatrix}.$$

Данное представление изображения является его математической моделью. Каждый элемент такой матрицы называется элементом изображения или пикселем.

Основными операциями, производимыми при проведении операции распознавания, являются:

- (1) предварительная обработка изображения — сглаживание, фильтрация по мех, повышение контраста;
- (2) бинаризация изображения и выделение контуров объектов;
- (3) методы обработки изображения, начальная фильтрация контуров по периметру, площади, коэффициенту формы, фрактальности и т. д.

Эти операции специфичны для каждой задачи, рассматриваемой при обработке в компьютерном зрении. Разработка и использование моделей, пригодных для эффективного решения задачи обнаружения соответствующих объектов, в значительной степени остается на грани науки и искусства, т. е. требует особого ноу-хау или, другими словами, знания предметной области, отражающего многолетний опыт исследования по решению частных задач. Более подробно эти операции рассмотрены в работе [11].

Данные методы используются для решения задачи анализа коррозионного растрескивания. Для задачи поиска пузырьков водорода на поверхности алюминия используется другой подход для распознавания объектов на изображении, так как из-за большого количества пузырьков и различных вариантов расположения их друг от друга контурный анализ здесь не так эффективен.

Для поиска пузырька на изображении воспользуемся методом Histogram of Oriented Gradients (HOG, гистограмма ориентированных градиентов [12]) для описания признаков пузырька на изображении. Это метод, основанный на оценке нормированных гистограмм градиентов яркости изображения. Изображение делится на небольшие прямоугольные области, в каждой из которых вычисляется градиент яркости. Для совокупности полученных градиентов строится гистограмма, которая является дескриптором. Для увеличения точности локальные гистограммы подвергаются нормализации по контрасту. Для этого вычисляется мера интенсивности на большем фрагменте изображения, который называется блоком, и полученное значение используется для нормализации. Нормализованные дескрипторы обладают лучшей инвариантностью по отношению к освещению. В силу своей локальности метод HOG устойчив к поворотам.

Будем искать «пузырек» на изображении с помощью «скользящего окна» размером 128×128 пикселей. Разобьем его на блоки размером 8×8 . Тогда одно окно размером 128×128 пикселей будет содержать 256 блоков. В каждом блоке посчитаем гистограмму ориентаций градиентов с 8 ячейками. Таким образом, получаем $8 \times 256 = 2048$ признаков. На рис. 4 представлена визуализация работы данного метода, изображение пузырька имеет размер 128×128 пикселей и разделено на 256 блоков. В данном случае для наглядности представлена масштабированная модель. Такое количество признаков невозможно учитывать без использования машинного обучения. Эффективным средством решения данной задачи является метод опорных векторов (SVM) [13].

Решение задачи бинарной классификации при помощи метода опорных векторов заключается в поиске некоторой линейной функции, которая правильно разделяет набор данных на два класса. Рассмотрим задачу классификации, где число классов равно двум.

Задачу можно сформулировать как поиск функции $y(x)$, принимающей значения больше нуля для векторов одного класса (для изображений пузырьков) и меньше нуля — для векторов другого класса (фон). В качестве исходных данных для решения поставленной задачи, т. е. поиска классифицирующей функции $y(x)$, дан тренировочный набор векторов пространства, для которых известна их

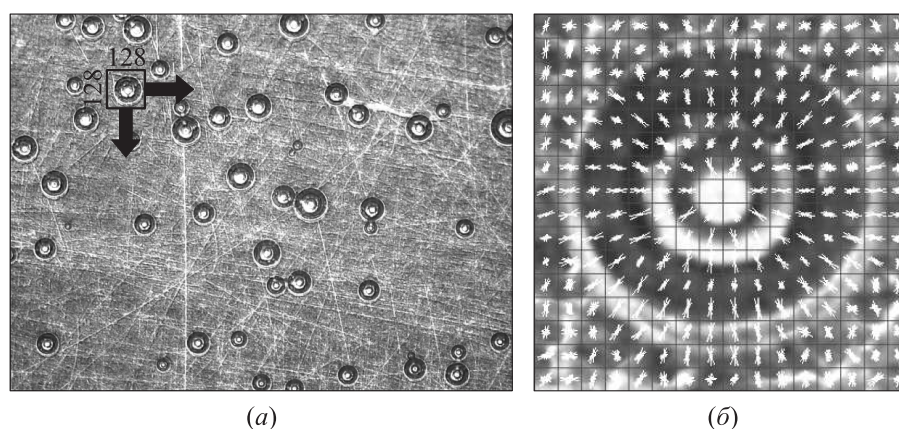


Рис. 4 Визуализация работы «скользящего окна» на примере изображения из набора данных эксперимента коррозии алюминия с водородной деполяризацией (а) и пример построения гистограмм ориентированных градиентов для пузырька на поверхности алюминия (б)

принадлежность к одному из классов. Семейство классифицирующих функций можно описать через функцию $y(x)$. Гиперплоскость определена вектором a и значением b , т. е. $y(x) = ax + b$. В результате решения задачи, т. е. построения SVM-модели, найдена функция, принимающая значения меньше нуля для

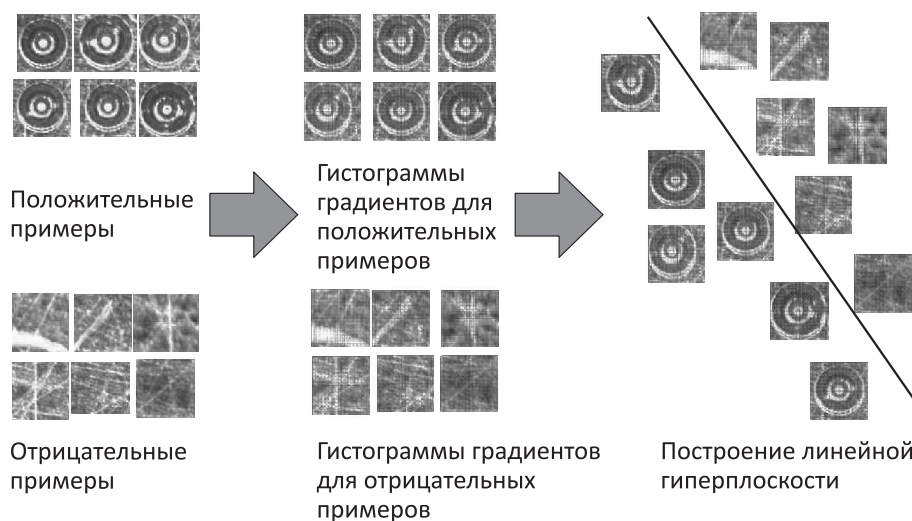


Рис. 5 Последовательность действий для обучения линейного классификатора SVM

векторов одного класса и больше нуля — для векторов другого класса. Для каждого нового объекта отрицательное или положительное значение определяет принадлежность объекта к одному из классов.

Предложим последовательность действий для обучения линейного классификатора SVM (рис. 5):

- соберем обучающую выборку фрагментом изображения с пузырьками и без;
- для каждого фрагмента посчитаем вектор из 2048 признаков;
- на полученной обучающей выборке обучим линейный классификатор SVM.

После того как найдены объекты на изображении, в данном случае пузырька, произведем расчет его площади. Так как контур пузырька представляет собой окружность, то, используя метод наименьших квадратов для окружности, найдем необходимые значения радиуса и центра пузырька.

5 Параллельные вычисления в задаче анализа механизма коррозионного процесса

Существуют разные способы организации параллельных вычислений. Наиболее простым и широко распространенным является распараллеливание по экспериментальной базе, т. е. организация однотипных вычислений для разных наборов начальных данных. Лучше всего подходят для распараллеливания задачи, обладающие внутренним параллелизмом. Наиболее эффективным и трудоемким способом является распараллеливание численных методов решения задач [14].

Рассматриваемый процесс обладает внутренним параллелизмом, который заключается в том, что большинство методов обработки изображения можно выполнять не по всему изображению целиком, а разбив его на части, учитывая граничные пересечения.

Распараллеливание вычислительного процесса по экспериментальной базе осуществляется по принципу «мастер–работчие», при котором один процессор (мастер) считывает данные и распределяет их между процессорами-работчими, а затем собирает результат вычислений и заносит его в базу. Так как при решении данных задач один эксперимент включает в себя порядка 200 фотографий, то даже распределение вычислений между 4 процессорами уже дает значительный прирост скорости вычислений.

Распараллеливание численного метода заключалось в решении задачи классификации методом опорных векторов. Эта задача была реализована с использованием библиотеки OpenCV. Она представляет собой библиотеку алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов.

Для параллельной обработки на GPU (graphics processing unit) модуль OpenCV содержит в себе несколько уровней функциональности. На нижнем уровне находятся реализации служебных операций, таких как инициализация

и управление GPU, работа с памятью, механизм асинхронных вызовов. Уровнем выше реализован широкий набор базовых функций обработки изображений — различные методы фильтрации, поиск максимума, аффинные преобразования, вычисление разности изображений в различных нормах и т. д. Список этих алгоритмов постоянно обновляется и дополняется, в целом они призваны облегчить разработку алгоритмов компьютерного зрения самого высокого уровня.

6 Результаты анализа эксперимента

Программный комплекс, реализующий ИВАС КорОценка, был написан на языке C++ в среде Qt SDK с использованием библиотеки OpenCV, в качестве системы управления базами данных (СУБД) использовалась SQLite.

Программный комплекс КорОценка включает модули обработки изображения, контурного анализа, фрактального анализа, поиска интересующих объектов на изображении, формирования отчетов. Отчеты включают в себя графики измерения фрактальной размерности, изменения числа наблюдаемых объектов во времени, графики взаимосвязи фрактальной размерности и скоростей роста трещины, заданных пользователем.

Данный программный комплекс позволяет получить фрактальную оценку коррозионной трещины. На рис. 6 представлен образец стали с выделенной границей, осуществленной в КорОценке, а соответствующая ей рассчитанная фрактальная размерность — на рис. 7.

КорОценка также позволяет провести анализ серии экспериментов. Обработка серии экспериментов анализа коррозионного растрескивания трубной стали X70 проводилась для различных растворов [15] (см. таблицу).



Рис. 6 Профиль трещины после анализа в программе КорОценка

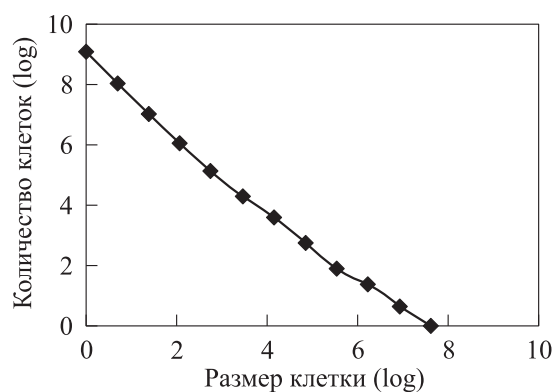


Рис. 7 Фрактальная размерность образца коррозионного растрескивания под напряжением, $D = 1,17$

Растворы для анализа коррозионного растрескивания трубной стали X70

Состав раствора	Наименование	Скорость
Фон + 1 мМ Na ₂ S	Образец № 5	0,18
Фон	Образец № 17	0,13
Фон + 10 мМ Mg(H ₂ PO ₄) ₂	Образец № 20	0,62
Фон + 30 мМ NaHCO ₃	Образец № 21	0,14
NS ₄ + боратный буфер	Образец № 22	0,4
NS ₄ + 50 мМ Mg(H ₂ PO ₄) ₂	Образец № 23	0,62
Фон + 1 мМ Na ₂ S	Образец № 26	0,17

Целью анализа являлось установление взаимосвязи скорости роста трещины и ее фрактальной размерности. В первоначальных входных данных для каждого образца раствора существовало несколько наборов изображений различных участков трещины. На рис. 8 отображены входные данные, соответствующие образцу № 5.

Был проведен расчет по входным данным для всех представленных образцов, используя алгоритмы распознавания, описанные в данной работе. Результат расчета представлен на рис. 9. Как можно заметить (см. рис. 9, б), данные по взаимосвязи можно разделить на два кластера (пустые и залитые значки). Такое поведение обсуждается; возможно, что оно зависит от раствора, в котором реагирует трубная сталь, с другой стороны, с учетом относительно малого объема входных данных это поведение можно отнести к погрешности получения исходных данных по скорости.

Для решения задачи анализа коррозии на поверхности алюминия была создана выборка, состоящая из ста положительных и отрицательных примеров. На полученной выборке был обучен линейный классификатор SVM. Из рис. 10, а следует, что классификатор неудовлетворительно справляется с пузырьками, которые частично попадают в кадр либо имеют небольшие размеры. Для получения общей картины изменения площади наблюдаемых пузырьков данным эффектом можно пренебречь.

Для проверки эффективности работы классификатора он был проверен на наборе данных другого эксперимента, происходящего в других условиях. Результат обработки данных эксперимента представлен на рис. 10, б. Несмотря на то что классификатор был обучен на данных первого эксперимента, он показал хорошую работоспособность и на альтернативном наборе данных.

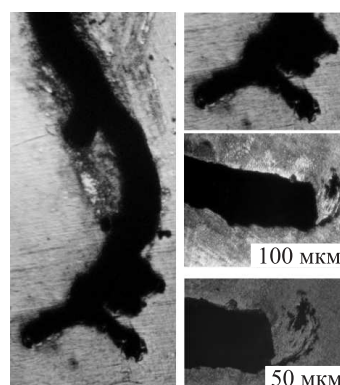


Рис. 8 Пример набора входных данных для образца № 5

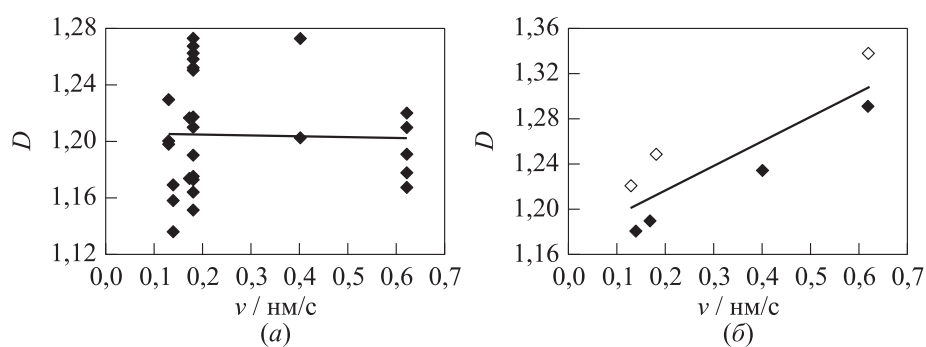
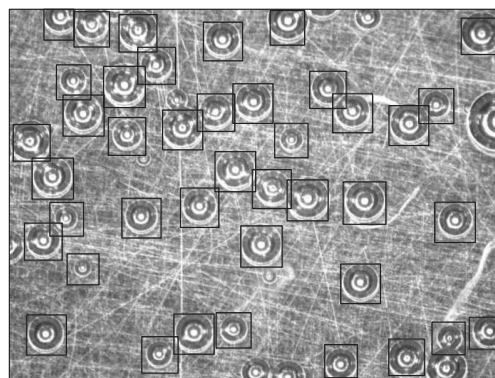
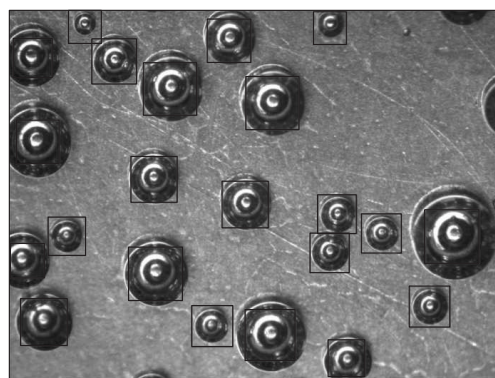


Рис. 9 Взаимосвязь скорости роста трещины и ее фрактальной размерности: (а) без учета типа трещины; (б) с учетом только коррозионной трещины ($y = 0,2176x + 1,1732$)



(а)



(б)

Рис. 10 Результат работы линейного классификатора на данных первоначального (а) и альтернативного (б) экспериментов

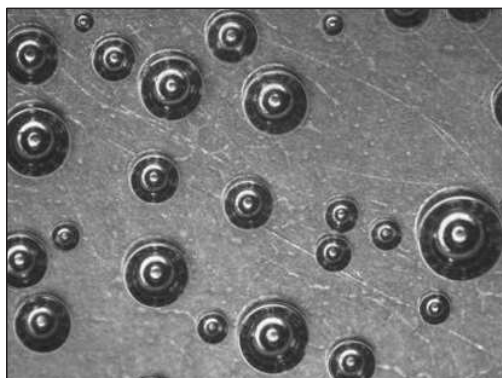


Рис. 11 Работа детектора пузырьков на поверхности металла

Использование параллельной реализации обучения SVM превосходно сказалось на времени выполнения расчета. В целом для задачи идентификации пузырьков на изображении ускорение составило более 15 раз.

Также реализована возможность поиска пузырьков методами контурного анализа, но эта операция требует введения ввода параметров бинаризации, шумоподавления, морфологического анализа и др. от пользователя (рис. 11).

7 Выводы

Разработана ИВАС КорОценка, которая включает:

- (1) реляционную СУБД коррозионных исследований;
- (2) методы для обработки, анализа и прогноза коррозионных процессов по данным натурного эксперимента;
- (3) возможность обработки данных на современных технических средствах — графических процессорах.

Литература

1. *Mandelbrot B. B.* Fractal geometry of nature. — San Francisco, CA, USA: W. H. Freeman and Co., 1982. 460 p.
2. *Рудакова О. А.* Фрактальный подход к анализу особенностей усталостного разрушения сварных швов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение, 2012. Т. 14. С. 102–107.
3. *Abdel-Qader I., Abudayyeh O., Kelly M. E.* Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges // J. Comput. Civil Eng., 2003. Vol. 17. No. 4. P. 255–263.

4. *Yamaguchi T., Nakamura S., Saegusa R., Hashimoto S.* Image-based crack detection for real concrete surfaces // *IEEJ T. Electr. Electr.*, 2008. Vol. 3. No. 1. P. 128–135.
5. *Abdel-Qader I., Pashaie-Rad S., Abudayyeh O., Yehia S.* PCA-based algorithm for unsupervised bridge crack detection // *Adv. Eng. Softw.*, 2006. Vol. 37. No. 12. P. 771–778.
6. *Prasanna P., Dana K., Gucunski N., Basily B.* Computer-vision based crack detection and analysis // *Proc. SPIE*, 2012. Vol. 8345. P. 115.
7. *Lattanzi D., Miller G. R.* Robust automated concrete damage detection algorithms for field applications // *J. Comput. Civil Eng.*, 2014. Vol. 28. No. 2. P. 253–262.
8. *Itzhar D., Dinstein I., Zilberberg T.* Pitting corrosion evaluation by computer image processing // *Corros. Sci.*, 1981. Vol. 21. No. 1. P. 17–22.
9. *Quinn M. J., Bailey M. G., Ikeda B. M., Shoesmith D. W.* Image-analysis techniques for investigating localized corrosion processes. — Atomic Energy of Canada Ltd., 1993. 52 p.
10. *Yan Y. H., Gao J. H., Liu Y., Lei S. C.* Recognition and classification of metal fracture surface models based on wavelet transform // *Acta Metall. Sin.*, 2002. Vol. 38. No. 3. P. 309–314.
11. *Еникеев М. Р., Малеева М. А., Губайдуллин И. М.* Компьютерное зрение в задаче исследования механизма развития коррозионных поражений // *Системы управления и информационные технологии*, 2015. Т. 59. № 1.1. С. 198–204.
12. *Dalal N., Triggs B.* Histograms of oriented gradients for human detection // *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings*. — IEEE, 2005. Vol. 1. P. 886–893.
13. *Vapnik V. N.* An overview of statistical learning theory // *IEEE T. Neural Networ.*, 1999. Vol. 10. No. 5. P. 988–999.
14. *Губайдуллин И. М., Линд Ю. Б.* Информационно-аналитическая система решения задач химической кинетики на основе современных высокопроизводительных вычислений // *Вестник Омского университета*, 2010. № 4. С. 137–146.
15. *Богданов Р. И.* Закономерности коррозионного растрескивания под напряжением трубной стали X70 в грунтовых электролитах с рН, близким к нейтральному. Дис. . . . канд. хим. наук. — М.: ИФХЭ РАН, 2012. 196 с.

Поступила в редакцию 14.12.16

INFORMATION COMPUTATION AND ANALYTICAL SYSTEM OF ESTIMATION AND FORECASTING OF CORROSION PROCESSES ON THE SURFACE OF STEEL AND ALUMINUM

*M. R. Enikeev*¹, *I. M. Gubaydullin*^{1,2}, and *M. A. Maleeva*³

¹Institute of Petrochemistry and Catalysis, Russian Academy of Sciences, 141 Pr. Oktyabria, Ufa 450075, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

²Ufa State Petroleum Technological University, 1 Kosmonavtov Str., Ufa 450062, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

³Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, 31 Leninsky Prosp., Moscow 199071, Russian Federation

Abstract: This work considers the problem of corrosion identification and quantitative estimation of corrosion damage, which is important in mechanical engineering, construction, and oil production. The goal of this work is to develop an information and analytical system for estimation and forecasting of corrosion processes on the surface of steel and aluminum. This system is considered on an example of data processing of the aluminum corrosion process and corrosion cracking of steel. The results of the work can be used for research of corrosion processes on the metal surface to establish patterns between surface condition and physical and chemical effects on it.

Keywords: information and analytical system; metal corrosion; computer vision

DOI: 10.14357/08696527170313

References

1. Mandelbrot, B. B. 1982. *Fractal geometry of nature*. San Francisco, CA: W. H. Freeman and Co. 460 p.
2. Rudakova, O. A. 2012. Fraktal'nyy podkhod k analizu osobennostey ustalostnogo razrusheniya svarnykh shvov [Fractal approach to the analysis of fatigue failure characteristics welds]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science] 14:102–107.
3. Abdel-Qader, I., O. Abudayyeh, and M. E. Kelly. 2003. Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges. *J. Comput. Civil Eng.* 17(4):255–263.
4. Yamaguchi, T., S. Nakamura, R. Saegusa, and S. Hashimoto. 2008. Image-based crack detection for real concrete surfaces. *IEEE T. Electr. Electr.* 3:128–135.
5. Abdel-Qader, I., S. Pashaie-Rad, O. Abudayyeh, and S. Yehia. 2006. PCA-based algorithm for unsupervised bridge crack detection. *Adv. Eng. Softw.* 37(12):771–778.
6. Prasanna, P., K. Dana, N. Gucunski, and B. Basily. 2012. Computer-vision based crack detection and analysis. *Proc. SPIE* 8345:115.

7. Lattanzi, D., and G. R. Miller. 2014. Robust automated concrete damage detection algorithms for field applications. *J. Comput. Civil Eng.* 28(2):253–262.
8. Itzhar, D., I. Dinstein, and T. Zilberberg. 1981. Pitting corrosion evaluation by computer image processing. *Corros. Sci.* 21(1):17–22.
9. Quinn, M. J., M. G. Bailey, B. M. Ikeda, and D. W. Shoesmith. 1993. *Image-analysis techniques for investigating localized corrosion processes*. Atomic Energy of Canada Ltd. 52 p.
10. Yan, Y. H., J. H. Gao, Y. Liu, and S. C. Lei. 2002. Recognition and classification of metal fracture surface models based on wavelet transform. *Acta Metall. Sin.* 38(3):309–314.
11. Enikeev, M. R., M. A. Maleeva, and I. M. Gubaydullin. 2015. Komp'yuternoe zrenie v zadache issledovaniya mekhanizma razvitiya korroziionnykh porazheniy [Computer vision in identification of corrosion processes]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Automat. Rem. Contr.] 59(1.1):198–204.
12. Dalal, N., and B. Triggs. 2005. Histograms of oriented gradients for human detection. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings*. IEEE. 1:886–893.
13. Vapnik, V. N. 1999. An overview of statistical learning theory. *IEEE T. Neural Networ.* 10(5):988–999.
14. Gubaydullin, I. M., and Yu. B. Lind. 2010. Informatsionno-analiticheskaya sistema resheniya zadach khimicheskoy kinetiki na osnove sovremennykh vysokoproizvoditel'nykh vychisleniya [Information-analytical system for solving problems of chemical kinetics based on modern high-performance computing]. *Vestnik Omskogo Universiteta* [Bulletin of Omsk University] 4:137–146.
15. Bogdanov, R. I. 2012. Zakonomernosti korroziionnogo rastreskivaniya pod napryazheniem trubnoy stali X70 v gruntovykh elektrolitakh s pH, blizkim k neytral'nomu [The patterns of stress-corrosion cracking of X70 tube steel in ground electrolytes with a pH close to neutral]. PhD Diss. Moscow: IPCE RAS. 196 p.

Received December 14, 2016

Contributors

Enikeev Marat R. (b. 1988) — PhD student, Institute of Petrochemistry and Catalysis, Russian Academy of Sciences, 141 Pr. Oktyabria, Ufa 450075, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; enikeev.marat.rus@gmail.com

Gubaydullin Irek M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, senior scientist, Institute of Petrochemistry and Catalysis, Russian Academy of Sciences, 141 Pr. Oktyabria, Ufa 450075, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; professor, Ufa State Petroleum Technological University, 1 Kosmonavtov Str., Ufa 450062, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; irekmars@mail.ru

Maleeva Marina A. (b. 1982) — Candidate of Science in chemistry, scientist, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, 31 Leninsky Prosp., Moscow 199071, Russian Federation; marina.maleeva@gmail.com

МАКЕТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНДИКАТОРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРЕНОСА НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ В СФЕРУ ТЕХНОЛОГИЙ*

В. А. Минин¹, И. М. Зацман², В. А. Хавансков³, С. К. Шубников⁴

Аннотация: Одна из наиболее актуальных задач в широком спектре исследований информационных взаимосвязей науки и технологий состоит в построении эффективной системы индикаторного оценивания интенсивности процессов переноса (трансфера) знаний из разных областей научных исследований в сферу технологического развития. Подобные исследования процессов переноса знаний проводятся в Институте проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук в рамках проекта по гранту РФФИ № 16-07-00075. Целью проекта является разработка средств информатики для оценки интенсивности процессов переноса. Данная работа посвящена вопросам создания макета информационной системы, предназначенной для индикаторного оценивания интенсивности этих процессов.

Ключевые слова: информационные взаимосвязи науки и технологий; цитирование публикаций в изобретениях; интенсивность процесса переноса знаний; индикаторное оценивание; информационные технологии

DOI: 10.14357/08696527170314

1 Введение

Данная работа посвящена вопросам создания макета информационной системы, предназначенной для исследования процессов переноса научных знаний в сферу технологий [1]. Разработка макета проводится в Институте проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук в рамках проекта по гранту РФФИ «Методы

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-07-00075).

¹ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, aleksiss@ya.ru

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, izatsman@yandex.ru

³ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, chavanskov@yandex.ru

⁴ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sergeysh50@yandex.ru

и информационные технологии оценивания интенсивности переноса научных знаний в сферу разработки технологий».

Целью проекта является разработка средств информатики для исследования этих процессов и оценки их интенсивности. Несмотря на многолетние теоретические и эмпирические исследования, которые были нацелены на изучение этих процессов [2–10], многоаспектная оценка их интенсивности является до сих пор во многом не решенной проблемой. Основной задачей проекта является разработка новых методов и моделей, которые должны существенно расширить спектр вычисляемых индикаторов интенсивности переноса (ИИП) научных знаний. Объектом исследования в проекте являются научные публикации, цитируемые в полнотекстовых описаниях изобретений. Это исследование является развитием работ Института проблем информатики по мониторингу и оцениванию результативности научной деятельности для трех основных категорий результатов исследований: непосредственных (outputs), конечных (outcomes) и результатов влияния (impacts) [11–18]. Индикаторы интенсивности переноса научных знаний необходимы для оценки результатов влияния научной деятельности на создание научно-технического задела, обеспечивающего технологическое развитие [19–23].

В рамках этого проекта запланировано:

- исследовать существующие методы и информационные модели процессов переноса научных знаний в сферу технологий;
- создать новые методы и модели, которые позволят разработать информационную технологию многоаспектного оценивания этих процессов с помощью количественных ИИП научных знаний;
- разработать информационную технологию оценивания ИИП знаний;
- создать действующий макет информационной системы для оценивания интенсивности этих процессов с помощью количественных индикаторов;
- провести с помощью макета эксперимент по оцениванию интенсивности процессов переноса знаний в сферу разработки информационных технологий.

Целью данной работы является описание принципов построения макета информационной системы.

Ранее в ходе выполнения данного проекта авторами была разработана модель процессов переноса. Она описывает взаимосвязи текстов описаний изобретений и цитируемых в них научных публикаций [1]. В ней учитывается разнообразие типов научных публикаций, отображающих научные результаты, используемые в патентуемых изобретениях. Интенсивность переноса оценивается с помощью индикаторов, отражающих разные аспекты процессов переноса научных знаний.

На основе этой модели разработан макет информационной системы, состоящей из двух функциональных подсистем. Первая подсистема предназначена для лингвистической обработки полнотекстовых описаний и библиографических данных изобретений, а вторая — для вычисления значений индикаторов.

Обе подсистемы используют базы данных, которые включают:

- описание сценариев исследования процессов переноса знаний;
- описания изобретений, в которых цитируются научные публикации;
- библиографические данные цитируемых научных публикаций;
- классификаторы направлений научных исследований (ННИ);
- Международную патентную классификацию (МПК).

2 Функциональные подсистемы макета

Информационная система, которая дает возможность оценить интенсивность процессов переноса научных знаний в сферу технологий, проектируется с использованием клиент-серверных технологий. Она состоит из двух функциональных подсистем, которые взаимодействуют с единой базой данных:

- (1) подсистема лингвистической обработки полнотекстовых описаний и библиографических данных изобретений;
- (2) подсистема вычисления значений ИИП научных знаний в сферу технологий.

Основная база данных информационной системы состоит из следующих взаимосвязанных таблиц:

- (1) таблица сценариев, содержащая параметры различных вариантов исследования процессов переноса знаний (ТбС);
- (2) таблица патентов, содержащая их библиографические данные; каждый из патентов соотнесен с некоторым сценарием исследования процессов переноса знаний¹ (ТбПат);
- (3) таблица ссылок на цитируемые публикации, каждая из которых привязана к определенному патенту, из полного описания которого она была извлечена (ТбСПуб);
- (4) таблица кодов рубрик ННИ, которые присвоены цитируемой публикации (ТбРуб);
- (5) таблица кортежей вида **⟨индекс МПК, ссылка на публикацию⟩** (ТбКрПуб);
- (6) таблица кортежей вида **⟨индекс МПК, рубрика ННИ⟩** (ТбКрРуб).

Обобщенная структурная схема информационной системы приведена на рис. 1.

Кроме вышеперечисленных таблиц основной базы данных в состав информационной системы входит технологическая база данных (ТбД), которая содержит ряд вспомогательных данных:

¹ Возможна привязка патента к нескольким сценариям, если исследуемые в них технологические области имеют тематическое пересечение.

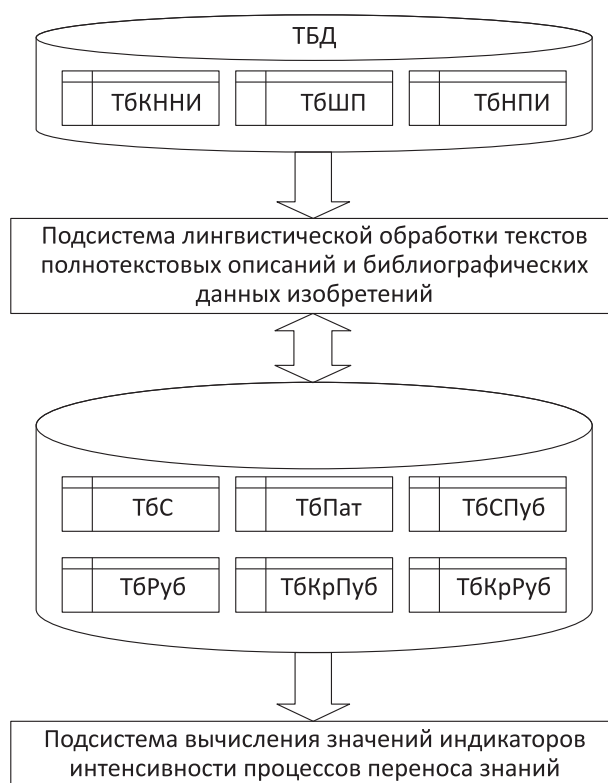


Рис. 1 Обобщенная структурная схема макета информационной системы

- (1) рубрики классификаторов ННИ (ТБКННИ);
- (2) таблицу шаблонов для поиска ссылок на публикации в текстах описаний изобретений (ТБШП);
- (3) таблицу нормализованных названий научных периодических изданий с указанием установленных для них кодов тематических рубрик ННИ (ТБНПИ).

2.1 Подсистема лингвистической обработки

Функционально данная подсистема макета предназначена для выполнения следующих этапов определения значений ИИП знаний (виды ИИП задаются в сценарии):

1. Постановка и формализация задачи исследования (путем специфицирования соответствующих параметров сценария) и мониторинг процесса вычисления ИИП знаний.

2. Определение массива номеров патентов на изобретения путем формирования запроса к информационно-поисковой системе (ИПС) MIMOSA, поставляемой Роспатентом, и формирование массива текстов описаний изобретений.
3. Формирование массива ссылок на публикации путем их поиска в полнотекстовых описаниях изобретений.
4. Рубрицирование найденных библиографических ссылок на научные публикации с использованием классификатора ННИ.
5. Экспертиза результатов автоматической обработки (на каждом технологическом этапе).

Подсистема включает в себя следующие функциональные модули и соответствующие им рабочие места руководителя исследований и экспертов системы:

- рабочее место руководителя исследований (РМ Руководителя);
- рабочее место эксперта поиска ссылок на публикации (РМ ЭПС);
- рабочее место эксперта рубрицирования публикаций (РМ ЭРП).

Рабочее место руководителя исследований обеспечивает выполнение следующих операций:

- (1) ввод параметров сценария для исследований процессов переноса знаний;
- (2) формирование списка патентов на изобретения, соответствующих заданным параметрам сценария;
- (3) мониторинг процесса вычисления ИИП научных знаний для заданных в сценарии видов ИИП.

Рабочее место ЭПС обеспечивает выполнение следующих операций:

- (1) формирование шаблонов для поиска ссылок на публикации;
- (2) мониторинг процесса автоматического поиска ссылок на публикации на основе сформированных шаблонов;
- (3) корректировка структуры найденных ссылок на публикации (в случае ошибок автоматического структурирования);
- (4) автоматизированный поиск ссылок на публикации в тех описаниях изобретений, в которых не были найдены ссылки в автоматическом режиме поиска;
- (5) указание вида публикаций, если он не был определен автоматически;
- (6) нормализация названий периодических изданий в найденных публикациях при их расхождении с перечнем нормализованных названий научных изданий;
- (7) мониторинг процесса формирования кортежей вида **<индекс МПК, ссылка на публикацию>**.

Рабочее место ЭРП обеспечивает выполнение следующих операций:

- (1) мониторинг процесса автоматического присвоения кодов рубрик ННИ найденным публикациям;
- (2) уточнение состава рубрик ННИ для публикации;
- (3) мониторинг процесса формирования кортежей вида **⟨индекс МПК, рубрика ННИ⟩**.

2.2 Подсистема вычисления индикаторов

Данная подсистема макета на входе имеет массивы кортежей вида **⟨индекс МПК, рубрика ННИ⟩**, которые формируются по завершении экспертного анализа результатов лингвистической обработки исходного массива полнотекстовых описаний изобретений.

Функционально подсистема решает три основные задачи:

1. Кластеризация кортежей по трем основаниям категоризации индикаторов, описанных в работе [1].
2. Формирование матриц частотностей¹ для ИИП знаний заданных в сценарии видов.
3. Вычисление и визуализация ИИП знаний тех видов, которые заданы в сценарии.

Согласно разработанной модели вычислений в результате кластеризации кортежей формируется система таблиц, на основе которых вычисляются те или иные виды ИИП знаний согласно сценарию. Результат формирования этой системы зависит от числа возможных значений параметра, соответствующего каждому основанию категоризации ИИП. Приведем пример с тремя основаниями и тремя соответствующими им параметрами [1]:

- параметр **K (knowledge type)** для основания «Фундаментальная или прикладная классификация переносимых знаний» имеет два значения: FR — fundamental research (фундаментальные исследования) и AR — applied research (прикладные исследования), результаты которых цитируются в изобретении;
- параметр **R (relation type)** для основания «Отношение цитируемых публикаций к изобретению» имеет три значения: E — эксперт; A — автор изобретения; EA — эксперт и автор одновременно цитируют публикацию;
- параметр **C (computation type)** для основания «Способ учета совпадающих рубрик в одном изобретении» имеет два значения: P — вторая и последующие совпадающие рубрики не учитываются; F — учитываются все совпадающие рубрики.

¹Матрица частотностей характеризует интенсивность взаимосвязей разделов технологической области и ННИ. Эти разделы и направления задаются с помощью индексов МПК и рубрик классификатора ННИ соответственно.

Следовательно, в результате кластеризации на третьем уровне категоризации ИИП будет сформировано 12 ($2 \times 3 \times 2$) таблиц кортежей [1, рис. 3 и его описание]. Для иллюстрации процесса формирования системы из 12 таблиц в подсистеме вычисления индикаторов рассмотрим в качестве примера описание изобретения к патенту № 2434280, который имеет индекс МПК G06F 21/00 «Устройства защиты компьютеров или компьютерных систем от несанкционированной деятельности» [24].

В результате обработки текста описания этого изобретения из подсистемы лингвистической обработки были получены массивы кортежей двух видов: кортежи со ссылками на публикации **⟨индекс МПК, ссылка на публикацию⟩** (табл. 1) и кортежи с рубриками публикаций **⟨индекс МПК, рубрика ННИ⟩** (табл. 2).

Рассмотрим результаты кластеризации на первом уровне категоризации ИИП [1, рис. 3]. Кортежи со ссылками на публикации вида **⟨индекс МПК, ссылка на публикацию⟩** формируются по основанию **R (relation type)** — «Кто процитировал научную публикацию: автор изобретения и/или эксперт». В описании патента есть две ссылки на публикацию «Гиббс У. Украсть секреты без сети // В мире науки, 2009»: ссылка эксперта, осуществлявшего экспертизу

Таблица 1 Кортежи с ссылками на публикации (с указанием авторства ссылки в третьем столбце (Е — эксперт; А — автор изобретения))

Индекс МПК изобретения к патенту № 2434280	Ссылки на публикации в тексте описания изобретения к патенту № 2434280	Авторство ссылки
G06F 21/00	<i>Гиббс У.</i> Украсть секреты без сети // В мире науки, 2009	Е
G06F 21/00	<i>Гиббс У.</i> Украсть секреты без сети // В мире науки, 2009	А
G06F 21/00	<i>Хореев А. А.</i> Технические каналы утечки акустической (речевой) информации // Специальная техника, 2009	А
G06F 21/00	<i>Юшков Ю. Г., Чумерин П. Ю., Артеменко С. Н. и др.</i> Экспериментальное исследование воздействия сверхвысокочастотных импульсов на работу персонального компьютера // Радиотехника и электроника, 2001. Т. 46. № 8. С. 1020	А
G06F 21/00	<i>Здухов Л. Н., Парфенов Ю. В., Петров С. Р., Сызранов В. С., Ульянов А. В., Янковский Б. Д.</i> Исследование возможности проникновения мощных импульсных помех в компьютеры по цепям электропитания и заземления // Научные труды Института теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, 2000	А

Таблица 2 Кортежи с рубриками публикаций (для случая использования в макете двух классификаторов ННИ — РФФИ и ГРНТИ)

Индекс МПК изобретения к патенту № 2434280	Рубрика ННИ по классификатору РФФИ или ГРНТИ
G06F 21/00	00.00.00
G06F 21/00	01-100
G06F 21/00	01-200
G06F 21/00	01-200
G06F 21/00	01-200
G06F 21/00	01-200
G06F 21/00	02-200
G06F 21/00	02-200
G06F 21/00	02-300
G06F 21/00	02-300
G06F 21/00	02-400
G06F 21/00	02-400
G06F 21/00	43.00.00
G06F 21/00	02-400
G06F 21/00	07-400
G06F 21/00	50.00.00
G06F 21/00	07-800
G06F 21/00	07-800
G06F 21/00	07-800
G06F 21/00	47.00.00
G06F 21/00	81.00.00
G06F 21/00	81.00.00

заявки на изобретение, и ссылка автора (см. табл. 1). Результат кластеризации кортежей по данному основанию будет иметь вид, представленный на рис. 2.

Как видно из рис. 2, для данного описания изобретения первая таблица пуста (есть только ее заголовок), так как эксперт не представил ссылок на научные публикации, которые не совпадают с авторскими, вторая таблица содержит три кортежа, а третья — один кортеж.

Теперь рассмотрим кластеризацию кортежей рубрик ННИ по основанию категоризации **К (knowledge type)** — «Фундаментальная или прикладная классификация переносимых знаний». Данное основание категоризации имеет два параметра: FR и AR [1, рис. 3].

Как следует из табл. 2, кортежи рубрик ННИ в этом примере после лингвистической обработки включают одновременно рубрики классификатора РФФИ и ГРНТИ. Поэтому кластеризация по данному основанию приведет к формированию двух таблиц (рис. 3). Правая таблица содержит рубрики классификатора

$$I = B(E)$$

Индекс МПК	Ссылка на публикацию
------------	----------------------

$$I = B(A)$$

Индекс МПК	Ссылка на публикацию
G06F 21/00	<i>Хореев А. А.</i> Технические каналы утечки акустической (речевой) информации // Специальная техника, 2009
G06F 21/00	<i>Юшков Ю. Г., Чумерин П. Ю., Артеменко С. Н. и др.</i> Экспериментальное исследование воздействия сверхвысокочастотных импульсов на работу персонального компьютера // Радиотехника и электроника, 2001. Т. 46. № 8. С. 1020
G06F 21/00	<i>Здухов Л. Н., Парфенов Ю. В., Петров С. Р., Сызранов В. С., Ульянов А. В., Янковский Б. Д.</i> Исследование возможности проникновения мощных импульсных помех в компьютеры по цепям электропитания и заземления // Научные труды Института теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, 2000

$$I = B(EA)$$

Индекс МПК	Ссылка на публикацию
G06F 21/00	<i>Гиббс У.</i> Украсть секреты без сети // В мире науки, 2009

Рис. 2 Три таблицы первого уровня категоризации по основанию R (relation type)

РФФИ, а левая — ГРНТИ. Отметим, что в конкретном сценарии может использоваться только одна из этих двух таблиц.

В этих таблицах есть совпадающие кортежи, которые сформированы при обработке *разных публикаций*, но цитируемых в одном описании изобретения. Возникает вопрос: как учитывать такие совпадающие кортежи? Для этого в работе [1] было введено третье основание категоризации ИИП научных знаний — **С (computation type)**, которое называется «Способ учета совпадающих рубрик ННИ публикаций, цитируемых в одном изобретении» и имеет два параметра: фактический (P — presence) и частотный (F — frequency), — смысловое содержание которых было описано выше.

Параметру P соответствуют те виды индикаторов, в которых учитывается только наличие некоторой рубрики ННИ в паре с индексом МПК для каждого изобретения, но не учитывается число одинаковых пар в правой таблице на рис. 3. Иначе говоря, при вычислении индикаторов этих видов на основе описания одного изобретения не учитывается число таких пар при определении ИИП знаний из научных публикаций с этой рубрикой ННИ в технологии с этим

$I = B(AR)$		$I = B(FR)$	
МПК	ННИ	МПК	ННИ
G06F 21/00	00.00.00	G06F 21/00	01-100
G06F 21/00	43.00.00	G06F 21/00	01-200
G06F 21/00	47.00.00	G06F 21/00	01-200
G06F 21/00	50.00.00	G06F 21/00	01-200
G06F 21/00	81.00.00	G06F 21/00	01-200
G06F 21/00	81.00.00	G06F 21/00	02-200
		G06F 21/00	02-200
		G06F 21/00	02-300
		G06F 21/00	02-300
		G06F 21/00	02-400
		G06F 21/00	02-400
		G06F 21/00	02-400
		G06F 21/00	07-400
		G06F 21/00	07-800
		G06F 21/00	07-800
		G06F 21/00	07-800

Рис. 3 Две таблицы первого уровня категоризации по основанию К (knowledge type)

$I = B(P)$			$I = B(F)$		
МПК	ННИ	Вес пары	МПК	ННИ	Вес пары
G06F 21/00	01-100	1	G06F 21/00	01-100	0,4375
G06F 21/00	01-200	1	G06F 21/00	01-200	1,75
G06F 21/00	02-200	1	G06F 21/00	02-200	0,875
G06F 21/00	02-300	1	G06F 21/00	02-300	0,875
G06F 21/00	02-400	1	G06F 21/00	02-400	1,3125
G06F 21/00	07-400	1	G06F 21/00	07-400	0,4375
G06F 21/00	07-800	1	G06F 21/00	07-800	1,3125

Рис. 4 Две таблицы первого уровня категоризации при рубрицировании по классификатору РФФИ по основанию С (computation type)

индексом МПК. Поэтому при вычислении индикаторов с параметром Р веса всех шести пар в левой таблице на рис. 4 равны единице.

Параметру F соответствуют те виды индикаторов, в которых учитывается число одинаковых пар в правой таблице на рис. 3. Иначе говоря, при вычислении индикаторов этих видов в описании одного изобретения учитывается число таких пар при определении ИИП знаний из научных публикаций с этой рубрикой ННИ в технологии с этим индексом МПК. Поэтому при вычислении индикаторов с параметром F веса всех шести пар в правой таблице на рис. 4 пропорциональны числу одинаковых пар в правой таблице на рис. 3.

На следующем этапе работы макета на основании таблиц формируются матрицы частотностей, соответствующие параметрам, заданным в сценарии для каждого вида ИИП, значения которых вычисляются.

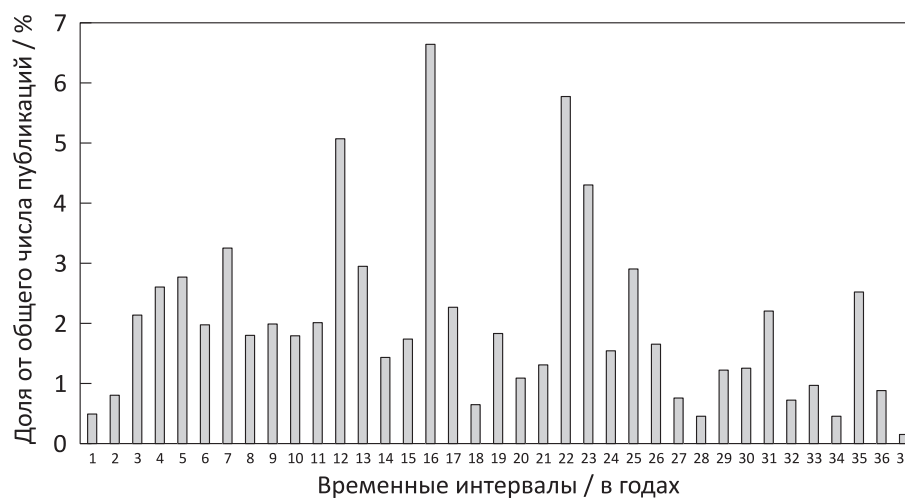


Рис. 5 Распределение времени отклика научных результатов в изобретениях по классу G06 (для авторов)

В основной базе данных макета любой кортеж связан с библиографическими данными как описания изобретения, так и цитируемых публикаций. При формировании матриц частотности и вычислении значений индикаторов эти данные определяют число индикаторов каждого вида. Иначе говоря, фиксирование тех или иных значений полей библиографических данных задает один из индикаторов каждого вида. Например, фиксирование значений поля «страна патентообладателя» дает возможность вычислить значения ИИП знаний отдельно для отечественных и зарубежных патентообладателей [22].

Использование полей библиографических данных позволяет в рамках этого макета определять значения и других категорий индикаторов, которые не имеют отношения к вычислению значений ИИП знаний. Например, можно сопоставить даты подачи заявок (публикации патентов на изобретения) и даты выхода в свет цитируемых публикаций. При сопоставлении этих дат можно вычислить значения индикатора, показывающего распределение времени «отклика» технического решения на публикацию научного результата. Согласно полученным экспериментальным данным существует несколько локальных пиков в распределения времени «отклика» для изобретений класса G06, патенты на которые выданы в период 2000–2012 гг. (рис. 5)¹.

На завершающей стадии работы макета используются стандартные средства визуализации значений индикаторов в виде таблиц или диаграмм, позволяющих

¹Для данного индикатора временной отклик отсчитывался от даты публикации патента на изобретения, что дает систематическое смещение приблизительно на 1,5 года (среднее время от подачи заявки до публикации патента).

исследователю процесса переноса знаний анализировать результаты, полученные в ходе выполнения заданного сценария исследований.

3 Заключение

Основным источником, позволяющим выявить те научные дисциплины, которые уже оказали и могут оказать в будущем то или иное воздействие на формирование научно-технического задела, является реестр Роспатента с текстами описаний изобретений, на которые выданы патенты. Для вычисления значений ИИП знаний из разных областей научных исследований в сферу технологического развития используются полнотекстовые описания изобретений. Они содержат ссылки на научные публикации, в которых отражены результаты научных исследований, использованные в этих изобретениях.

Разработанный макет дает возможность вычислить значения ИИП, выделяя в описаниях изобретений цитируемые в них публикации. Информационная технология, реализованная в макете, может быть применена и для изучения степени будущего влияния направлений поисковых исследований на развитие сферы технологий, если использовать информационные ресурсы Роспатента достаточно глубокой временной ретроспективы и методы статистического прогнозирования.

Отметим, что косвенным результатом исследований, выполняемых в рамках данного проекта по гранту РФФИ, может явиться вклад в организацию и обеспечение целевых поисковых научных исследований, поскольку они способствуют выявлению точек приложения финансовых, организационных и иных ресурсов с целью оптимизации научно-технического задела, обеспечивающего технологическое развитие.

Литература

1. Минин В. А., Зацман И. М., Хавансков В. А., Шубников С. К. Методы индикаторного оценивания процессов переноса знаний из области научных исследований в сферу технологического развития // Научно-техническая информация. Серия 2, 2017. № 8. С. 1–12.
2. Narin F., Noma E. Is technology becoming science? // *Scientometrics*, 1985. Vol. 7. No. 3-6. P. 369–381.
3. Mansfield E. Academic research and innovation // *Res. Policy*, 1991. Vol. 20. No. 1. P. 1–12.
4. Schmoch U. Tracing the knowledge transfer from science to technology as reflected in patent indicators // *Scientometrics*, 1993. Vol. 26. P. 193–211.
5. Mansfield E. Academic research underlying industrial innovations: Sources, characteristics and financing // *Rev. Econ. Statistics*, 1995. Vol. 77. No. 1. P. 55–62.
6. Narin F., Olivastro D. Linkage between patents and papers: An interim EPO/US comparison // *Scientometrics*, 1998. Vol. 41. No. 1-2. P. 51–59.
7. Mansfield E. Academic research and industrial innovation: An update of empirical findings // *Res. Policy*, 1998. Vol. 26. No. 7-8. P. 773–776.

8. *Tijssen R. J. W., Buter R. K., Van Leeuwen Th. N.* Technological relevance of science: An assessment of citation linkages between patents and research papers // *Scientometrics*, 2000. Vol. 47. No. 2. P. 389–412.
9. *Van Looy B., Zimmermann E., Veugelers R., Verbeek A., Mello J., Debackere K.* Do science–technology interactions pay on when developing technology? An exploratory investigation of 10 science-intensive technology domains // *Scientometrics*, 2003. Vol. 57. No. 3. P. 355–367.
10. European Communities. Third European Report on Science & Technology Indicators. — Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. 451 p.
11. *Зацман И. М., Веревкин Г. Ф.* Информационный мониторинг сферы науки в задачах программно-целевого управления // *Системы и средства информатики*, 2006. Т. 16. № 1. С. 185–210.
12. *Зацман И. М., Шубников С. К.* Принципы обработки информационных ресурсов для оценки инновационного потенциала направлений научных исследований // *Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Тр. IX Всеросс. научн. конф. RCDL'2007.* — Переславля: Университет города Переславля, 2007. С. 35–44.
13. *Зацман И. М., Кожунова О. С.* Семантический словарь системы информационного мониторинга в сфере науки: задачи и функции // *Системы и средства информатики*, 2007. Т. 17. № 1. С. 124–141.
14. *Zatsman I., Kozhunova O.* Evaluating for institutional academic activities: Classification scheme for R&D indicators // *10th Conference (International) on Science and Technology Indicators: Book of abstracts.* — Vienna: ARC GmbH, 2008. P. 428–431.
15. *Zatsman I., Kozhunova O.* Evaluation system for the Russian Academy of Sciences: Objectives-Resources-Results approach and R&D indicators // *Atlanta Conference on Science and Innovation Policy Proceedings / Eds. S. E. Cozzens, P. Catalan.* — 2009. <http://smartech.gatech.edu/bitstream/1853/32300/1/104-674-1-PB.pdf>.
16. *Zatsman I., Durnovo A.* Incompleteness problem of indicators system of research programme // *11th Conference (International) on Science and Technology Indicators: Book of abstracts.* — Leiden: CWTS, 2010. P. 309–311.
17. *Архипова М. Ю., Зацман И. М., Шулъга С. Ю.* Индикаторы патентной активности в сфере информационно-коммуникационных технологий и методика их вычисления // *Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО*, 2010. № 4. С. 93–104.
18. *Зацман И. М., Дурново А. А.* Моделирование процессов формирования экспертных знаний для мониторинга программно-целевой деятельности // *Информатика и её применения*, 2011. Т. 5. Вып. 4. С. 84–98.
19. *Хавансков В. А., Шубников С. К.* Поиск и рубрицирование ссылок на цитируемые публикации в электронных библиотеках полнотекстовых описаний изобретений // *Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Тр. XVI Всеросс. научн. конф. RCDL-2014.* — Дубна: ОИЯИ, 2014. С. 165–173.
20. *Минин В. А., Зацман И. М., Хавансков В. А., Шубников С. К.* Индикаторы тематических взаимосвязей науки и технологий: от текста к числам // *Информатика и её применения*, 2014. Т. 8. Вып. 3. С. 114–125.

21. *Минин В. А., Зацман И. М., Хавансков В. А., Шубников С. К.* Индикаторы тематических взаимосвязей науки и информационно-компьютерных технологий в начале XXI века // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 2. С. 111–120.
22. *Минин В. А., Зацман И. М., Хавансков В. А., Шубников С. К.* Интенсивность цитирования научных публикаций в изобретениях по информационно-компьютерным технологиям, патентуемых в России отечественными и зарубежными заявителями // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 2. С. 107–122.
23. *Zatsman I. M., Lukyanov G. V., Minin V. A., Havanskov V. A., Shubnikov S. K.* Indicator evaluation of processes of knowledge transfer from science to technology // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 3. С. 132–141.
24. Описание изобретения к патенту № RU 2 434 280 C1. http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2434280&TypeFile=html.

Поступила в редакцию 14.08.17

**PROTOTYPING AN INFORMATION SYSTEM
FOR THE CALCULATION OF INDICATORS OF THE INTENSITY
OF THE TRANSFER OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE
IN THE FIELD OF TECHNOLOGY**

V. A. Minin, I. M. Zatsman, V. A. Havanskov, and S. K. Shubnikov

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: One of the most urgent and intricate tasks in a wide range of research devoted to information interplay between science and technologies could be described as a construction of a holistic and effective system of indicator assessment of the intensity of transfer processes of knowledge from different scientific areas in the field of technological development. Such studies of knowledge transfer processes have been carried out for several years in the Institute of Informatics Problems of the Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences in the framework of project RFBR No. 16-07-00075. The objective of the project is the development of information processing tools designed to assess the intensity of knowledge transfer processes. This article is devoted to creation of a testbed information system for evaluation of activity of these processes.

Keywords: information science–technology linkages; citation of publications in inventions; intensity of knowledge transfer process; indicator assessment; information technologies

DOI: 10.14357/08696527170314

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-07-00075).

References

1. Minin, V. A., I. M. Zatsman, V. A. Khavanskov, and S. K. Shubnikov. 2017. Methods of indicator-based assessment of knowledge transfer from science to technology. *Automatic Documentation Math. Linguistics* 51(4):180–190.
2. Narin, F., and E. Noma. 1985. Is technology becoming science? *Scientometrics* 7(3-6):369–381.
3. Mansfield, E. 1991. Academic research and innovation. *Res. Policy* 20(1):1–12.
4. Schmoch, U. 1993. Tracing the knowledge transfer from science to technology as reflected in patent indicators. *Scientometrics* 26:193–211.
5. Mansfield, E. 1995. Academic research underlying industrial innovations: Sources, characteristics and financing. *Rev. Econ. Statistics* 77(1):55–62.
6. Narin, F., and D. Olivastro. 1998. Linkage between patents and papers: An interim EPO/US comparison. *Scientometrics* 41(1-2):51–59.
7. Mansfield, E. 1998. Academic research and industrial innovation: An update of empirical findings. *Res. Policy* 26(7-8):773–776.
8. Tijssen, R. J. W., R. K. Buter, and Th. N. Van Leeuwen. 2000. Technological relevance of science: An assessment of citation linkages between patents and research papers. *Scientometrics* 47(2):389–412.
9. Van Looy, B., E. Zimmermann, R. Veugelers, A. Verbeek, J. Mello, and K. Debackere. 2003. Do science–technology interactions pay on when developing technology? An exploratory investigation of 10 science-intensive technology domains. *Scientometrics* 57(3):355–367.
10. European Communities. 2003. Third European Report on Science & Technology Indicators. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 451 p.
11. Zatsman, I. M., and G. F. Verevkin. 2006. Informatsionny monitoring sfery nauki v zadachakh programmno-tselevogo upravleniya [Information monitoring of goal-oriented activities in science]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 16(1):185–210.
12. Zatsman, I. M., and S. K. Shubnikov. 2007. Printsipy obrabotki informatsionnykh resursov dlya otsenki innovatsionnogo potentsiala napravleniy nauchnykh issledovaniy [The principles of processing of information resources for estimation of innovative potential of the directions of scientific research]. *Tr. IX Vseross. nauchn. konf. RCDL'2007 "Elektronnye biblioteki: perspektivnye metody i tekhnologii, elektronnye kolleksii"* [9th All-Russian Scientific Conference RCDL'2007 "Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections" Proceedings]. Pereslavl-Zalessky: Pereslavl University. 35–44.
13. Zatsman, I. M., and O. S. Kozhunova. 2007. Semanticheskii slovar' sistemy informatsionnogo monitoringa v sfere nauki: zadachi i funktsii [Semantic dictionary of

- information monitoring system in science: Tasks and functions]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 17(1):124–141.
14. Zatsman, I., and O. Kozhunova. 2008. Evaluating for institutional academic activities: Classification scheme for R&D indicators. *10th Conference (International) on Science and Technology Indicators: Book of abstracts*. Vienna: ARC GmbH. 428–431.
 15. Zatsman, I., and O. Kozhunova. 2009. Evaluation system for the Russian Academy of Sciences: Objectives-Resources-Results approach and R&D indicators. *Atlanta Conference on Science and Innovation Policy Proceedings*. Eds. S. E. Cozzens and P. Catalan. Available at: <http://smartech.gatech.edu/bitstream/1853/32300/1/104-674-1-PB.pdf> (accessed August 17, 2017).
 16. Zatsman, I., and A. Durnovo. 2010. Incompleteness problem of indicators system of research programme. *11th Conference (International) on Science and Technology Indicators: Book of abstracts*. Leiden: CWTS. 309–311.
 17. Arkhipova, M. Yu., I. M. Zatsman, and S. Yu. Shul'ga. 2010. Indikatory patentnoy aktivnosti v sfere informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologiy i metodika ikh vychisleniya [Indicators of patent activities in the sphere of information and communication technologies and a technique of their computation]. *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO* [Economics, Statistics and Informatics. UMO Bull.] 4:93–104.
 18. Zatsman, I. M., and A. A. Durnovo. 2011. Modelirovanie protsessov formirovaniya ekspertnykh znaniy dlya monitoringa programmno-tselevoy deyatel'nosti [Modeling of processes for creation of expert knowledge for monitoring of goal-oriented programme activities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 5(4):84–98.
 19. Havanskov, V. A., and S. K. Shubnikov. 2014. Poisk i rubritsirovaniye ssylok na tsitiruemye publikatsii v elektronnykh bibliotekakh polnotekstovyykh opisaniy izobreteniy [Search and classifying references to cited publications in electronic libraries of full-text descriptions of inventions]. *Tr. XVI Vseross. nauchn. konf. RCDL-2014 "Elektronnyye biblioteki: perspektivnye metody i tekhnologii, elektronnyye kolleksii"* [16th All-Russian Scientific Conference RCDL-2014 "Electronic Libraries: Perspective Methods and Technologies, Electronic Collections" Proceedings]. Dubna: JINR. 165–173.
 20. Minin, V. A., I. M. Zatsman, V. A. Havanskov, and S. K. Shubnikov. 2014. Indikatory tematicheskikh vzaimosvyazey nauki i tekhnologiy: Ot teksta k chislam [Indicators of thematic science–technology linkages: From text to numbers]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(3):114–125.
 21. Minin, V. A., I. M. Zatsman, V. A. Havanskov, and S. K. Shubnikov. 2015. Indikatory tematicheskikh vzaimosvyazey nauki i informatsionno-komp'yuternyykh tekhnologiy v nachale XXI veka [Indicators for thematic linkages between science and information and computer technologies at the beginning of the XXI century]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(2):111–120.
 22. Minin, V. A., I. M. Zatsman, V. A. Havanskov, and S. K. Shubnikov. 2016. Intensivnost' tsitirovaniya nauchnykh publikatsiy v izobreteniyakh po informatsionno-komp'yuternym tekhnologiyam, patentuemym v Rossii otechestvennymi i zarubezhnymi zayavitelyami [Intensity of citation of scientific publications in inventions on information and computer technologies patented in Russia by domestic and foreign applicants]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(2):107–122.

23. Zatsman, I. M., G. V. Lukyanov, V. A. Minin, V. A. Havanskov, and S. K. Shubnikov. 2017. Indicator evaluation of processes of knowledge transfer from science to technology. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(3):132–141.
24. Description of the patent No. RU 2 434 280 C1. Available at: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2434280& TypeFile=html (accessed August 17, 2017).

Received August 14, 2017

Contributors

Minin Vladimir A. (b. 1941) — Doctor of Sciences, consultant, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; aleksiss@ya.ru

Zatsman Igor M. (b. 1952) — Doctor of Sciences, Head of Department, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; izatsman@yandex.ru

Havanskov Valerij A. (b. 1950) — scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; chavanskov@yandex.ru

Shubnikov Sergej K. (b. 1955) — senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sergeysh50@yandex.ru

ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ СИТУАЦИОННОЙ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

А. В. Ильин¹, В. Д. Ильин²

Аннотация: Представлены основы концепции ситуационной информатизации жизнедеятельности населения страны, рассматриваемой как совокупность образовательной, производственной и других видов деятельности. Ситуационная информатизация изучается как средство поэтапного организационного и технологического совершенствования объекта путем планируемых переходов от отправной ситуации к целевой, представленных формализованными описаниями заданной совокупности пространств состояний (оборонного, экономического и др.), характеризующих потенциал страны. Наблюдение за объектом осуществляется на основе портретов достигнутых ситуаций. Информационные технологии, разработанные на основе методологии ситуационной информатизации, реализуются в человеко-машинной среде решения задач (названной *s*-средой), которая служит инфраструктурным основанием онлайн-сервисов (банковских, логистических и др.). Предложены определения системы государственного управления и экономического механизма (ЭМ) (как специализированных систем статусного соперничества), потенциала страны, типов и портретов ситуаций и др.

Ключевые слова: ситуационная информатизация; человеко-машинная среда решения задач; жизнедеятельность населения страны; система государственного управления; экономический механизм; потенциал страны; портрет ситуации; цифровая экономика

DOI: 10.14357/08696527170315

1 Введение

Начавшаяся в 1960-х гг. автоматизация проектирования машин [1, 2], программных средств и других вещей стала вдохновляющим примером эффективного применения компьютеров в качестве помощников людей. В наши дни интенсивного развития облачных вычислений и интернет-сервисов различного назначения (навигационных, образовательных и др.) [3, 4] внимание исследователей и разработчиков информационных технологий привлечено к идее комплексной автоматизации различных видов деятельности на основе онлайн-сервисов.

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, avilyin@ipiran.ru

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, vdilyin@ipiran.ru

С середины 1990-х гг. значение успешной реализации этой идеи (получившей название «digital economy» («цифровая экономика»)) неуклонно растет и связывается с конкурентоспособностью корпораций и стран [5–7]. В США особое внимание уделяется управлению знаниями и проектированию новой продукции, имеющей хорошую рыночную перспективу; в ФРГ — встраиваемым системам и умным фабрикам; в Японии — киберфизическим системам и передовой робототехнике. В 2017 г. в нашей стране утверждена программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [8], а в 2016 г. свою позицию по цифровой экономике определило сообщество стран G20 [9].

Концепция ситуационной информатизации жизнедеятельности рассматривается как вклад в методологическое обеспечение реализации программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [8]. Эта концепция является обобщающим развитием концепции [10] и методологии *ситуационной информатизации государственного управления России* [11], созданных в 1995–1996 гг. при выполнении научно-технического проекта информатизации государственного управления. В 2015 г. было разработано обновление методологии ситуационной информатизации [12].

Ситуационная информатизация жизнедеятельности населения страны (далее для краткости — информатизация) рассматривается как комплекс средств организационного и технологического совершенствования объекта путем планируемых переходов от *отправной ситуации* к *целевой*, представленных формализованными описаниями *образовательного, экономического* и других пространств состояний, характеризующих *потенциал страны* [11, 12]. Информационным основанием информатизации служит *человеко-машинная среда решения задач (s-среда)* [13], решаемых с помощью персональных компьютерных средств, *онлайн-сервисов* (включающих сервисы планирования ресурсов [14–16]), роботов и робототехнических устройств. На каждом этапе выполняется взаимоувязанная совокупность проектов информатизации государственного управления, экономической, научной, образовательной и других видов деятельности [11, 12, 14–28].

Учитывая ограничение на объем статьи, авторы представили в сокращенном виде часть концепции, посвященную ситуационной информатизации государственного управления и экономической деятельности как ключевых составляющих жизнедеятельности населения страны.

1.1 Научно-исследовательская работа, результаты которой представлены в статье

Потенциал страны, информатизация экономического механизма и технологии товарно-денежного обращения *нормализованного экономического механизма* (НЭМ) [18, 20, 21, 23–27] — эти и другие сущности, рассматриваемые в концепции, исследуются в рамках научно-исследовательской работы (НИР), посвященной созданию методологии информатизации НЭМ и программной реа-

лизации комплекса экспертного планирования ресурсов на основе интернет-сервисов [14–16, 18, 20, 21, 23–27]. Научно-исследовательская работа выполняется в Институте проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук в соответствии с государственным заданием, полученным в составе научного проекта «Фундаментальные научные исследования в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы».

1.2 Выделение фрагментов текста

Для выделения определений, замечаний и примеров используются следующие средства:

□ ⟨фрагмент описания⟩ □ ≈ утверждение (определение, аксиома и др.) (здесь и далее символ ≈ заменяет слово «означает»);

◇ ⟨фрагмент описания⟩ ◇ ≈ замечание;

◎ ⟨фрагмент описания⟩ ◎ ≈ пример.

Курсивом выделены первые вхождения названий понятий и фрагменты описания, к которым автор хочет привлечь внимание.

2 Понятийный аппарат

□ *Жизнедеятельность* населения страны рассматривается как совокупность различных видов деятельности (образовательной, производственной, оборонной и др.). □

□ *Потенциал страны* определяется характеристиками *населения, естественной среды обитания и систем организации и обеспечения жизни*. □

Изменение потенциала страны позволяет судить о состоянии объекта государственного управления. Приоритетный список показателей уровня развития потенциала страны и их истолкование (включающее способы оценки и стимулирования изменений) составляют основу планирования процесса управления жизнедеятельностью населения [11, 12].

2.1 Информатизация государственного управления

□ *Цель государственного управления* — защита потенциала страны и его развитие посредством правового регулирования *процессов статусной конкуренции между физическими и юридическими лицами* [11, 12]. □

В состав системы государственного управления входят: управляемый объект (часть регулируемых правовыми средствами процессов статусной конкуренции между физическими и юридическими лицами, влияющих на развитие потенциала страны и его защищенность); устройство, конкретизирующее цель системы

управления и задающее правила, определяющие множество допустимых состояний системы управления (законодательная ветвь власти); решающее и исполняющее устройства, которые вырабатывают и реализуют управляющие воздействия (исполнительная ветвь власти); контролирующее устройство, определяющее недопустимые отклонения от заданных правилами допустимых состояний системы управления (судебная ветвь власти).

□ *Органы государственного управления* — организационно-технические комплексы, предназначенные для формирования и охраны правового пространства; регулирования установленной законом части конкурентных процессов жизнедеятельности; планирования защиты и развития потенциала страны и организации процессов реализации выработанных планов; планирования и реализации взаимодействия с другими странами, направленного на повышение конкурентоспособности своей страны. □

На каждом этапе цель государственного управления воплощается в комплексе задач планирования развития потенциала страны (представленного спецификациями его *отправного* и *целевого* состояний) и организации процессов выполнения планов посредством регулирования установленной законом части процессов *статусной конкуренции* [11, 12].

◇ Для успешной защиты и развития потенциала страны необходимо, чтобы на каждом этапе ее развития: образовательные учреждения страны готовили требуемое число специалистов, прежде всего для производства жизненно-необходимых товаров (продовольствия, электроэнергии, одежды, жилья и др.; образовательных, оздоровительных, лечебных и других услуг) и защиты потенциала страны; образовательная и экономическая системы своевременно адаптировались к потребностям производства жизненно-необходимых товаров и обеспечения защиты потенциала страны [25]. ◇

□ *Модель объекта государственного управления* — формализованное представление процессов статусной конкуренции, влияющих на потенциал страны и регулируемых правовыми средствами. □

□ *Система государственного управления как объект ситуационной информатизации* — это стохастический нестационарный организационно-технический объект, характерными признаками которого являются: сложная s-среда [13] специального назначения, правила применения значительной части сервисов которой строго регламентированы; существенная взаимозависимость органов и объекта управления (объект управления, подвергаясь управляющим воздействиям, в свою очередь, оказывает (как минимум) информационное воздействие на органы управления, влияя на их поведение); слабая идентифицируемость [12]. □

Поэтапная ситуационная информатизация жизнедеятельности предполагает совершенствование структуры органов государственного управления и ее сервисов. Предложения по усовершенствованию, их обоснование и способы реализации на основе сервисов s-среды отражает *методология ситуационной информатизации государственного управления*. Первая и вторая версии этой методологии были созданы в Институте проблем информатики РАН [11, 12].

◇ Методология нужна для прокладывания научно обоснованного пути от намерений, представленных в концепции, к реализации. ◇

Чтобы конкретизировать изложение, далее рассматриваются основы методологии ситуационной информатизации государственного и экономического механизмов России (далее для краткости — методология).

□ *Методология* включает определение ее цели, представленной комплексом задач совершенствования объекта; описание понятийного аппарата, представленного системами *целевых, реализационных и формализующих* понятий; описание постановок и методов решения задач, определяющих отношения связи между понятиями [11, 12]. □

К основным относятся задачи формирования *портретов ситуаций* (на основании наблюдений *пространств состояний*), анализа ситуаций, проектирования ресурсно-обоснованных управляющих воздействий, принятия решений и контроля их исполнения. Управляющие воздействия проектируются так, чтобы при заданных ресурсных ограничениях сделать возможным перемещение из *отправной ситуации* в заданную окрестность *целевой ситуации*.

□ *Государственная ситуация* — событийный фрагмент состояний системы государственного управления, представленный временным рядом портретов этой ситуации, предназначенным для анализа ситуации и выработки управляющих воздействий [11, 12].

Целевой называется ситуация, которую планируется создать в результате исполнения управляющего воздействия; *отправной* — ситуация, применительно к которой вырабатывается воздействие, направленное на достижение целевой ситуации; *достигнутой* — ситуация, сложившаяся в результате исполнения управляющего воздействия. □

□ *Портрет ситуации* — специфицированное описание *пространств состояний* объекта управления. Содержит данные, характеризующие существенные параметры состояния объекта, располагаемые варианты воздействий на объект и ресурсы, необходимые для реализации этих вариантов [11, 12]. □

Портрет ситуации формируется в соответствии со специальной системой правил. На вход этой системы поступают данные пространств состояний, данные о располагаемых типах управляющих воздействий и о располагаемых ресурсах, необходимых для реализации воздействий. На выходе — данные о *типе ситуации, прототипных средствах воздействий* и ресурсной оценке для воздействий каждого типа.

Система государственного управления как объект ситуационной информатизации представлена s-моделью [13], получившей название совокупности *госпространств*. □ Госпространства представляют собой заданный экспертами набор разноаспектных представлений состояния объекта.

Госпространство — конкретизированное s-представление заданной части объекта ситуационного управления. Совокупность госпространств — s-представление заданных частей объекта, отражающее его состояние и используемое для формирования портрета государственной ситуации.

Каждое госпространство характеризуется названием и атрибутами (⊙ типами нарушений, управляющих воздействий и ресурсов, необходимых для их реализации (обеспечивающих ресурсов) ⊙). Госпространство определено, если заданы: название (⊙ коммуникационное госпространство ⊙); типы нарушений с оценками критичности; допустимые управляющие воздействия; обеспечивающие ресурсы; *системы обязательных и ориентирующих правил* [11, 12, 23], устанавливающие соответствие между нарушениями и управляющими воздействиями, между управляющими воздействиями и обеспечивающими ресурсами; правила формирования обеспечивающих ресурсов [10–12]. □

Для описания каждого из госпространств должны быть определены классы нарушений, которые приводят к возникновению неординарных ситуаций.

⊙ Типы нарушений *экономического госпространства*: нарушения закона о госбюджете; бездействие или незаконные действия при нарушениях законов об экономическом использовании ресурсов страны (в частности, земель, ископаемых, стратегического сырья); нарушения антимонопольного закона. ⊙

Процессы выработки и исполнения управляющих воздействий (далее для краткости — воздействий) представлены комплексами *целевых* и *вспомогательных* задач. К целевым относятся задачи построения и анализа портретов ситуаций, проектирования ресурсно-обоснованных воздействий, планирования процессов реализации воздействий и контроля их исполнения. Взаимодействие с источниками сообщений, документирование сообщений, обработка и архивирование документов — эти и подобные им задачи относятся к вспомогательным (обеспечивающим решение целевых задач).

Проект государственного воздействия — документально представленный план достижения целевой государственной ситуации.

Достижение целевой ситуации — пошаговый процесс, завершающийся, когда портреты достигнутой и целевой ситуаций признаны достаточно близкими. Сравнительный анализ отличий портретов целевой и отправной ситуаций дает исходные данные для планирования процесса достижения целевой ситуации.

Результат планирования должен быть представлен в виде ресурсно-обоснованного проекта перехода от отправной к целевой ситуации.

Государственные воздействия воплощаются с использованием средств следующих типов: *информационного, экономического, административного, судебного, силового*.

Выбор типов средств воздействий осуществляется экспертами с использованием баз данных о типах располагаемых средств и *прототипах управляющих воздействий*. Требуемый набор ресурсов зависит от выбранной композиции средств воздействий.

Информатизация процесса выработки проектов предполагает методологическое обеспечение разработки и применения базы *прототипов государственных воздействий*; базы *прототипов ресурсного обеспечения государственных воздействий*; базы *спецификаций госпространств*; технологии взаимодействия с источниками сообщений (включая спецификации запросов и ответов, протоколы

и дисциплины взаимодействия); процессов формирования и анализа портретов государственных ситуаций; *ресурсно-обоснованных проектов государственных воздействий*; взаимодействия с Решающей Стороной (представления проектов); процесса передачи для исполнения утвержденного проекта государственного управляющего воздействия.

2.2 Информатизация экономической деятельности

Информатизация экономической деятельности рассматривается как средство поэтапного перехода от действующего ЭМ к НЭМ (см. рисунок).

Нормализованный ЭМ — это рыночный ЭМ, комплексы которого функционируют на основе электронных сервисов [14–16, 18, 20, 21, 23–27]. Устройство и правила работы НЭМ, установленные государственными законами, стимулируют граждан вести хозяйственную деятельность, ориентированную на защиту и повышение экономического потенциала своей страны [2]. Делается это посредством налогов, пошлин и других экономических инструментов [18, 20, 21, 23, 25].

□ Система *имущественных статусов (ис-система)* — реализуемая в s-среде [13] система документального представления денежной и неденежной составляющих имущественных статусов эд-участников. Денежная составляющая выражена значениями сумм нормализованных денег [26] в разделах *уникальных глобальных счетов эд-участников (ис-счетов)*. Неденежная — документами, подтверждающими право собственности на недвижимость, транспорт и другое имущество, которое при необходимости может рассматриваться как залоговое. □

□ *Ис-счет* — унифицированный электронный документ, состоящий из *валютных частей* (активируемых банком-регулятором), каждая из которых имеет следующие основные разделы: «*Располагаю*», «*Кредитование*», «*Инвестирование*», «*Налоги и сборы*», «*Дарение*», «*Пожертвование*».

Управление экономической деятельностью	Ресурсное обеспечение Производство товаров Торговля Резервирование жизненно-необходимых товаров Инвестирование Государственный бюджет, резервы, налоги, пошлины Региональные бюджеты и налоги Профессиональное образование и развитие населения Развитие систем организации и обеспечения жизни Восстановление и развитие среды обитания Фонды социальной защиты Документирование товарно-денежного обращения и имущественных статусов, выполняемое банковской системой
--	--

Состав НЭМ: основные комплексы

Совокупность допустимых операций (при документировании сделок) определяется принадлежностью суммы к подразделу счета (© сумма из подраздела «Получено» раздела «Инвестирование» может использоваться только для оплаты товаров, типы которых перечислены в инвестиционных договорах ©). □

Поскольку ис-счет имеет *поливалютную структуру*, он применим для документирования результатов внутренней и внешней экономической деятельности [20, 21, 23, 25–27]. Существование ис-счета предполагает, что его владелец имеет *уникальный глобальный идентификатор*.

□ Никакое изменение сумм ис-счета не может быть осуществлено без *документируемого зашифрованного подтверждения владельца ис-счета* (а в неординарных ситуациях — после документируемого зашифрованного подтверждения определенного законом государственного органа). □

Изменение состояния *ис-счета* может быть реализовано только после получения *государственного удостоверения допустимости операции* над ис-счетом. Удостоверение выдает специальный онлайн-сервис банка-регулятора. Основанием для получения удостоверения служат данные совершаемой операции (сделка купли-продажи, договорного инвестирования или др.).

Таким способом исключаются возможности нарушения установленных законом правил товарно-денежного обращения (недопустимые экономические сделки, неуплата установленных законом государственных сборов и др.).

Банковская система НЭМ включает *персональные электронные банки физических лиц (ПЭБы), корпоративные электронные банки (КЭБы), банки-провайдеры и банк-регулятор*, под управлением которого функционируют все другие банки.

□ *Банк-регулятор* — государственное учреждение, управляющее функционированием банковской системы НЭМ. Задачи банка-регулятора, реализуемые посредством онлайн-сервисов: выдача и отзыв лицензий на право банковской деятельности (владельцам ПЭБов, КЭБов и банков-провайдеров); активация и деактивация валютных частей ис-счетов; контроль выполнения правил банковской деятельности; анализ финансовой составляющей экономической деятельности и представление результатов в порядке, установленном законом; разработка, модификация и утверждение прошедших тестирование унифицированных форм банковских документов (включая ис-счета); контроль эффективности размещения средств *государственного денежного резерва, фондов социальной защиты, других государственных фондов и фондов с государственным участием*. □

Банк-регулятор располагает сетью серверов, размещенных на территории страны, под юрисдикцией которой находится экономическая система.

□ *Банки-провайдеры* — коммерческие предприятия, учрежденные юридическими лицами (или объединениями юридических лиц, объединениями физических лиц, объединениями юридических и физических лиц), занимающимися производством товаров или их реализацией.

Онлайн-сервисы банка-провайдера предназначены для: обслуживания запросов владельцев ис-счетов, направляемых посредством ПЭБов и КЭБов при

совершении сделок (включая запросы на удостоверение состояния ис-счетов партнеров по сделкам, направляемые с их разрешения); хранения и обновления зашифрованных копий ис-счетов клиентов банка-провайдера; анализа инвестиционных запросов потенциальных инвесторов и получателей инвестиций (банки-провайдеры могут выполнять заказы получателей инвестиций на консолидацию заявок инвесторов, чтобы комплексировать заказанную сумму инвестиции); регистрации заключенных договоров (с контролем допустимости сделок) и ведения баз данных таких договоров; юридического сопровождения реализуемых сделок. □

□ Персональные электронные банки физических лиц и КЭБы (как программно-аппаратные средства) — это, как правило, переносные s-машины [13], наделенные коммуникационными функциями передовых смартфонов. В ПЭБах и КЭБах в зашифрованной форме хранятся оригиналы ис-счетов и документов по сделкам. Изменение состояния ис-счета имеет право инициировать только его владелец, совершающий сделку. Запросы на обслуживание сделки (удостоверение состояния ис-счета и сохранение обновленной копии ис-счета) получают банки-провайдеры, сервисами которых пользуются совершающие сделку участники. □

3 Заключение

1. Концепция, основы которой представлены в статье, является выражением инновационного подхода к ситуационной информатизации *связанных между собой видов деятельности населения страны* (для краткости названных *жизнедеятельностью*). Предложенный подход является обобщающим развитием подхода к *ситуационной информатизации государственного управления России* [10–12] и рассматривается как вклад в методологическое обеспечение реализации государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации».
2. Целью ситуационной информатизации жизнедеятельности является организационно-технологическое совершенствование объекта, направленное на повышение защищенности и рост потенциала страны, увеличение конкурентоспособности ее граждан, образовательных и научных учреждений, производственных предприятий и других организаций.
3. Имеющие ключевое значение экономическая деятельность и государственное управление рассматриваются как ядро объекта информатизации.
4. Мониторинг состояния объекта осуществляется с помощью *портретов ситуаций*, формируемых по результатам наблюдения совокупности *пространств состояний* (правового, оборонного, образовательного, экономического и др.), параметры которых отражают уровни защищенности и развития *потенциала страны* [10–12].

Литература

1. *Coons S. A., Mann R. W.* Computer-aided design related to the engineering design process. — Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1960. <http://images.designworldonline.com.s3.amazonaws.com/CADhistory/8436-TM-5.pdf>.
2. *Yares E.* 50 years of CAD // Design World, February 13, 2013. designworldonline.com/50-years-of-cad.
3. Five benefits of Software as a Service. — Trumba Corporation, 2007. http://www.trumba.com/connect/knowledgecenter/pdf/Saas_paper_WP-001.pdf.
4. *Jamsa K. A.* Cloud computing. — Burlington: Jones & Bartlett Learning, 2013. 322 p.
5. *Tapscott D.* The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence. — New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996. 342 p.
6. *Christensen C. M.* The innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail. — Boston, MA, USA: Harvard Business School Press, 1997. <http://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=46>.
7. Oxford Economics. The new digital economy: How it will transform business. 2015. <http://www.pwc.com/mt/en/publications/assets/the-new-digital-economy.pdf>.
8. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р. 87 с. <http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2017/07/programma-tsifrov-econ.pdf>.
9. G20 digital economy development and cooperation initiative. — G20 Summit, 5 September 2016. <http://en.kremlin.ru/supplement/5111>.
10. *Ильин В. Д.* Концепция ситуационной информатизации государственного управления России. — М.: ИПИ РАН, 1995. 37 с.
11. *Ильин В. Д.* Основания ситуационной информатизации. — М.: Наука, Физматлит, 1996. 180 с.
12. *Ильин В. Д.* Основания ситуационной информатизации. Версия 2015 г. — М.: ИПИ РАН, 2015. 130 с.
13. *Ильин А. В., Ильин В. Д.* Создание человеко-машинной среды решения задач // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 149–161.
14. *Ильин А. В.* Интернет-сервис планирования расходов // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 2. С. 111–122.
15. *Pyin A. V., Pyin V. D.* Variational online budgeting taking into account the priorities of expense items // Agris on-line Papers in Economics and Informatics, 2016. Vol. 8. No. 3. P. 51–56.
16. *Ильин А. В.* Интернет-сервисы планирования ресурсов. 2017. <https://www.resplan.com>.
17. *Ильин В. Д., Соколов И. А.* Символьная модель системы знаний информатики в человеко-автоматной среде // Информатика и её применения, 2007. Т. 1. Вып. 1. С. 66–78.
18. *Ильин В. Д.* Модель нормализованной экономики (НЭК-модель): основы концепции // Управление большими системами, 2009. Вып. 25. С. 116–138.
19. *Ильин В. Д.* Технология научной деятельности: подход к повышению продуктивности // Управление большими системами, 2009. Вып. 29. С. 88–107.

20. Ильин А. В., Ильин В. Д. S-экономика: механизм хозяйствования в эпоху Интернета. — М.: ИПИ РАН, 2011. 105 с.
21. Ilyin V. D. S-economics. — Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences, 2012. 54 p.
22. Ильин А. В., Ильин В. Д. Научно-образовательные веб-ресурсы. — М.: ИПИ РАН, 2013. 112 с.
23. Ilyin A. V., Ilyin V. D. Towards a normalized economic mechanism based on E-services // Agris on-line Papers in Economics and Informatics, 2014. Vol. 6. No. 3. P. 39–49.
24. Ilyin A. V., Ilyin V. D. E-trade with direct lending and normalized money // Agris on-line Papers in Economics and Informatics, 2015. Vol. 7. No. 4. P. 57–64.
25. Ильин А. В., Ильин В. Д. Информатизация экономического механизма. — М.: ИПИ РАН, 2015. 130 с.
26. Ильин В. Д. Нормализованные деньги в системе имущественных статусов // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 206–217.
27. Ильин В. Д. Нормализация банковских онлайн-сервисов // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 2. С. 147–157.
28. Ильин В. Д. Объекты научного авторства и оценка их значимости // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 179–188.

Поступила в редакцию 15.08.17

BASICS OF THE CONCEPT OF SITUATIONAL INFORMATIZATION OF POPULATION ACTIVITIES

A. V. Ilyin and V. D. Ilyin

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The article presents basics of the concept of situational informatization of the population activities considered as an aggregate of education, production, and other kinds of activity. Situational informatization is studied as a means of stage-by-stage organizational and technological improvement of the object through planned transitions from the starting situation to the target one. The situations are presented by formalized descriptions of the predefined set of states spaces (defense, economics, etc.), which characterize the country’s potential. The object is monitored on the basis of portraits of the achieved situations. Information technologies based on the situational informatization methodology are implemented in the human-machine environment for problem solving (“s-environment”) which serves as an infrastructural base of online services (banking, logistics, etc.). The definitions of state government system, economic mechanism (as the specialized systems of status rivalry), country’s potential, the types and the portraits of situations, etc. are given.

Keywords: situational informatization; human–machine environment for problem solving; population activities; state government system; economic mechanism; country’s potential; digital economy

DOI: 10.14357/08696527170315

References

1. Coons, S. A., and R. W. Mann. 1960. *Computer-aided design related to the engineering design process*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology. Available at: <http://images.designworldonline.com.s3.amazonaws.com/CADhistory/8436-TM-5.pdf> (accessed August 22, 2017).
2. Yares, E. February 13, 2013. 50 years of CAD. *Design World*. Available at: <http://www.designworldonline.com/50-years-of-cad/> (accessed August 22, 2017).
3. Trumba Corporation. 2007. *Five benefits of Software as a Service*. Available at: http://www.trumba.com/connect/knowledgecenter/pdf/Saas_paper_WP-001.pdf (accessed August 22, 2017).
4. Jamsa, K. A. 2013. *Cloud computing*. Burlington: Jones & Bartlett Learning. 322 p.
5. Tapscott, D. 1996. *The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence*. New York, NY: McGraw-Hill. 342 p.
6. Christensen, C. M. 1997. *The innovator’s dilemma: When new technologies cause great firms to fail*. Boston, MA: Harvard Business School Press. Available at: <http://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=46> (accessed August 22, 2017).
7. Oxford Economics. 2015. The new digital economy: How it will transform business. Available at: <http://www.pwc.com/mt/en/publications/assets/the-new-digital-economy.pdf> (accessed August 22, 2017).
8. Pravitel’stvo Rossiyskoy Federatsii [Russian Government]. July 28, 2017. Programma “Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii” [The program “Digital Economy of the Russian Federation”]. 87 p. Available at: <http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2017/07/programma-tsifrov-econ.pdf> (accessed August 22, 2017).
9. G20 Summit. September 5, 2016. G20 digital economy development and cooperation initiative. Available at: <http://en.kremlin.ru/supplement/5111> (accessed August 22, 2017).
10. Ilyin, V. D. 1995. *Kontseptsiya situatsionnoy informatizatsii gosudarstvennogo upravleniya Rossii* [The concept of situational informatization of public administration of Russia]. Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 37 p.
11. Ilyin, V. D. 1996. *Osnovaniya situatsionnoy informatizatsii* [Fundamentals of situational informatization]. Moscow: Nauka, Fizmatlit. 180 p.
12. Ilyin, V. D. 2015. *Osnovaniya situatsionnoy informatizatsii. Versiya 2015 g.* [Fundamentals of situational informatization. Version 2015]. Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 130 p.
13. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2016. Sozdanie cheloveko-mashinnoy sredy resheniya zadach [Creation of a human–machine environment for problem solving]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):149–161.

14. Ilyin, A. V. 2015. Internet-servis planirovaniya raskhodov [The online service for cost planning]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(2):111–122.
15. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2016. Variational online budgeting taking into account the priorities of expense items. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics* 8(3):51–56.
16. Ilyin, A. V. 2017. Internet-servisny planirovaniya resursov [The online resource planing services]. Available at: <https://www.res-plan.com> (accessed August 22, 2017).
17. Ilyin, V. D., and I. A. Sokolov. 2007. Simvol'naya model' sistemy znaniy informatiki v cheloveko-avtomatnoy srede [The symbolic model of informatics knowledge system in a human-automaton environment]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 1(1):66–78.
18. Ilyin, V. D. 2009. Model' normalizovannoy ekonomiki (NEk-model'): Osnovy kontseptsii [The model of normalized economics (NEc-model): Basics of framework]. *Upravlenie bol'shimi sistemami [Large-Scale Systems Control]* 25:116–138.
19. Ilyin, V. D. 2009. Tekhnologiya nauchnoy deyatel'nosti: podkhod k povysheniyu produktivnosti [Technology of scientific activities: An approach to improve efficiency]. *Upravlenie bol'shimi sistemami [Large-Scale Systems Control]* 29:88–107.
20. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2011. *S-ekonomika: Mekhanizm khozyaystvovaniya v epokhu Interneta* [S-economics: Mechanism of management in the Internet epoch]. Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 105 p.
21. Ilyin, V. D. 2012. *S-economics*. Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 54 p.
22. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2013. *Nauchno-obrazovatel'nye veb-resursy* [Scientific-educational Web resources]. Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 112 p.
23. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2014. Towards a normalized economic mechanism based on E-services. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics* 6(3):39–49.
24. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2015. E-trade with direct lending and normalized money. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics* 7(4):57–64.
25. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2015. *Informatizatsiya ekonomicheskogo mekhanizma* [Informatization of the economic mechanism]. Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 130 p.
26. Ilyin, V. D. 2015. Normalizovannyye den'gi v sisteme imushchestvennykh statusov [Normalized money in the system of property statuses]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):206–217.
27. Ilyin, V. D. 2016. Normalizatsiya bankovskikh onlayn-servisov [Normalization of online banking services]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(2):147–157.
28. Ilyin, V. D. 2016. Ob"ekty nauchnogo avtorstva i otsenka ikh znachimosti [Objects of scientific authorship and assessment of their significance]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):179–188.

Received August 15, 2017

Contributors

Ilyin Alexander V. (b. 1975)— Candidate of Science in technology, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; avilyin@ipiran.ru

Ilyin Vladimir D. (b. 1937)— Doctor of Science in technology, professor, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russia; vdilyin@ipiran.ru

ОЦЕНКА КРЕДИТОСПОСОБНОСТИ ФИЗИЧЕСКОГО ЛИЦА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО АНАЛИЗА ЕГО ПЛАТЕЖЕСПОСОБНОСТИ

Р. Р. Рзаев¹, А. А. Алиев²

Аннотация: Предлагается нечеткий подход к оценке кредитоспособности физического лица (ФЛ) на основании комплексной обработки доступной информации, характеризуемой объективными и субъективными признаками его финансовой стабильности. В поддержку этому на предварительной стадии исследования осуществлена классификация уровней финансовой стабильности ФЛ с применением нечеткой системы логического вывода.

Ключевые слова: физическое лицо; показатель платежеспособности; нечеткое множество; нечеткое отношение; нечеткий вывод

DOI: 10.14357/08696527170316

1 Введение

На сегодняшний день существует множество методов оценки платежеспособности ФЛ, применение которых в той или иной степени обеспечивает информационно-аналитическую поддержку процесса принятия решений в области банковского кредитования в условиях неопределенности. Среди них можно выделить три основные группы: методы скоринговой оценки [1], методы по изучению кредитной истории заемщика и методы оценки финансовых количественных показателей платежеспособности [2, 3].

В работе [4] авторами рассматривался альтернативный подход к оценке кредитоспособности ФЛ на основе применения двух нечетких методов принятия решений в условиях неопределенности. Однако решение этой задачи в основном было ориентировано на относительную оценку ФЛ в составе группы с другими потенциальными заемщиками и в конечном итоге было сведено к относительному ранжированию на предмет их степени платежеспособности. Поэтому авторы решили продолжить свои исследования и попытаться сформулировать и протестировать метод, который позволил бы оценить платежеспособность ФЛ в индивидуальном порядке, т. е. получить для него не относительную, а в определенном смысле абсолютную оценку.

¹Институт систем управления Национальной академии наук Азербайджана, gaminrza@yahoo.com

²Бакинский государственный университет, aaliev@mail.ru

2 Постановка задачи

Анализ финансовой стабильности ФЛ подразумевает наличие списка ключевых показателей, характеризующих его экономическую и личную платежеспособность на текущий момент. В большинстве случаев к числу таких показателей относят: текущий и перспективный совокупный доход; объем депозитных вкладов; обеспечение кредита и его ликвидность; сумма ежемесячных платежей по кредиту; сумма ежемесячных доходов; сумма финансовых обязательств; общее материальное положение; социальная стабильность; возраст; кредитная история. Для оценки этих ключевых показателей банками (или кредитными учреждениями) устанавливаются соответствующие критерии в зависимости от вида запрашиваемого кредита (например, на приобретение или строительство жилья, на покупку транспортных средств или товаров длительного пользования и пр.), его объема и срока предоставления, вида обеспечения (залога). На основании современных подходов к оценке ФЛ (см., например, [5, 6]) в [4] авторами компилирован следующий список таких критериев оценки платежеспособности ФЛ: K_1 — текущий и перспективный совокупный чистый доход; K_2 — объем депозитных вкладов; K_3 — обеспечение кредита и его ликвидность; K_4 — финансовый коэффициент РТИ (Payment-to-Income ratio), K_5 — ОТИ (Obligations-to-Income ratio); K_6 — финансовый коэффициент платежеспособности; K_7 — общее материальное положение; K_8 — социальная стабильность; K_9 — возраст; K_{10} — кредитная история. Руководствуясь этими критериями, необходимо сформулировать, описать и протестировать новый метод для индивидуальной оценки кредитоспособности частного ФЛ, характеризуемого как объективными, так и субъективными показателями финансовой стабильности. При этом в качестве предварительной процедуры необходимо осуществить классификацию уровней финансовой стабильности ФЛ.

3 Классификация уровней финансовой стабильности физических лиц с применением метода нечеткого логического вывода

Очевидно, что оценка кредитоспособности ФЛ на основании комплексной обработки доступной информации, характеризуемой объективными и субъективными признаками его финансовой стабильности, является многокритериальной процедурой, подразумевающей агрегирование оценки в каждом конкретном случае. Поэтому выберем пять оценочных понятий для характеристики уровня платежеспособности ФЛ: u_1 — «СЛИШКОМ НЕПРИЕМЛЕМЫЙ»; u_2 — «НЕПРИЕМЛЕМЫЙ»; u_3 — «МЕНЕЕ ЧЕМ ПРИЕМЛЕМЫЙ»; u_4 — «ПРИЕМЛЕМЫЙ»; u_5 — «БОЛЕЕ ЧЕМ ПРИЕМЛЕМЫЙ». Проще говоря, под множеством $S = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ будем понимать совокупность признаков, по которым будем классифицировать уровни платежеспособности ФЛ на текущий момент времени. Тогда, полагая критерии оценки K_i ($i = 1, \dots, 10$) лингвистическими переменными со значениями (термами) u_k ($k = 1, \dots, 5$), оцен-

ку кредитоспособности ФЛ осуществим с использованием достаточного набора нечетких импликативных правил вида «Если $\langle \dots \rangle$, то $\langle \dots \rangle$ » и на их основе установим соответствующую шкалу градации удовлетворительности платежеспособности ФЛ. Для этого за основу выберем следующие исходные суждения:

- e_1 : «Если у ФЛ — заявителя на получение кредита финансовые коэффициенты ОТИ и платежеспособности, а также его общее материальное положение и социальная стабильность являются приемлемыми, то уровень его кредитоспособности является удовлетворительным»;
- e_2 : «Если к тому же у ФЛ объем депозитных вкладов и финансовый коэффициент РТИ также являются приемлемыми, то уровень кредитоспособности данного ФЛ является более чем удовлетворительным»;
- e_3 : «Если дополнительно к тому, что оговорено в e_2 , приемлемыми являются текущий и перспективный совокупный чистый доход, обеспечение кредита и его ликвидность, возраст и кредитная история, то уровень кредитоспособности ФЛ является безупречным»;
- e_4 : «Если имеет место все, что оговорено в e_3 , за исключением информации о приемлемости финансового коэффициента РТИ и возраста ФЛ, то уровень кредитоспособности ФЛ является очень удовлетворительным»;
- e_5 : «Если объем депозитных вкладов ФЛ является приемлемым, финансовые коэффициенты РТИ, ОТИ и платежеспособности, а также показатели общего материального положения и социальной стабильности являются приемлемыми, но при этом обеспечение кредита и его ликвидность, а также возраст ФЛ являются неприемлемыми, то уровень кредитоспособности ФЛ все же является удовлетворительным»;
- e_6 : «Если у заявителя показатель обеспечения кредита и его ликвидности, финансовый коэффициент платежеспособности, показатели общего материального положения и кредитной истории являются неприемлемыми, то уровень кредитоспособности ФЛ является неудовлетворительным».

Анализ данных высказываний как причинно-следственных связей позволяет считать критерии оценки K_i ($i = 1, \dots, 10$) входными характеристиками вербальной модели, отождествляемых в виде термов ПРИЕМЛЕМЫЙ и/или НЕПРИЕМЛЕМЫЙ, являющихся одними из значений соответствующих лингвистических переменных. В качестве выходной характеристики вербальной модели будет выступать лингвистическая переменная — уровень кредитоспособности ФЛ, принимающая в приведенных высказываниях пять значений (термов). Тогда, полагая термы входных K_i и выходной Y лингвистических переменных нечеткими множествами, на базе данных высказываний построим следующие импликативные правила:

- e_1 : «Если $K_5 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_6 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_7 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$ и $K_8 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, то $Y = \text{УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ}$ »;

- e_2 : «Если $K_2 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_4 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_5 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_6 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_7 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$ и $K_8 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, то $Y = \text{БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ}$ »;
- e_3 : «Если $K_1 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_2 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_3 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_4 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_5 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_6 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_7 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_8 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_9 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$ и $K_{10} = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, то $Y = \text{БЕЗУПРЕЧНЫЙ}$ »;
- e_4 : «Если $K_1 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_2 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_3 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_5 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_6 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_7 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_8 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$ и $K_{10} = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, то $Y = \text{ОЧЕНЬ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ}$ »;
- e_5 : «Если $K_2 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_3 = \text{НЕПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_4 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_5 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_6 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_7 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_8 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$ и $K_9 = \text{НЕПРИЕМЛЕМЫЙ}$, то $Y = \text{УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ}$ »;
- e_6 : «Если $K_3 = \text{НЕПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_6 = \text{НЕПРИЕМЛЕМЫЙ}$, $K_7 = \text{НЕПРИЕМЛЕМЫЙ}$ и $K_{10} = \text{НЕПРИЕМЛЕМЫЙ}$, то $Y = \text{НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ}$ ».

Лингвистическую переменную Y зададим на множестве $J = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 1\}$. Тогда используемые в правилах ее термы опишем по средствам нечетких множеств с соответствующими функциями принадлежности [7], а именно: $\forall x \in J$ будем иметь:

- $S = \text{УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ}$, $\mu_S(x) = x$;
- $MS = \text{БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ}$, $\mu_{MS}(x) = \sqrt{x}$;
- $P = \text{БЕЗУПРЕЧНЫЙ}$, $\mu_P(x) = \begin{cases} 1, & x = 1; \\ 0, & x < 1; \end{cases}$
- $VS = \text{ОЧЕНЬ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ}$, $\mu_{VS}(x) = x^2$;
- $US = \text{НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ}$, $\mu_{US}(x) = 1 - x$.

Фаззификацию термов из левых частей принятых правил осуществим с помощью соответствующих гауссовских функций принадлежности

$$\mu_k(u_i) = \exp \left\{ -\frac{(u_i - u_{k0})^2}{\sigma_k^2} \right\} \quad (k = 1, \dots, 10), \quad (1)$$

восстанавливающих соответствующие нечеткие множества по опорному вектору $(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$, где $u_i = d_i$ ($i = 1, \dots, 5$) (рис. 1), при этом значения для параметра σ_k подбираются исходя из степени важности критериев оценки.

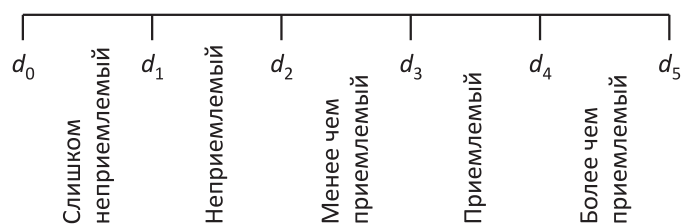


Рис. 1 Равномерная градация показателей кредитоспособности

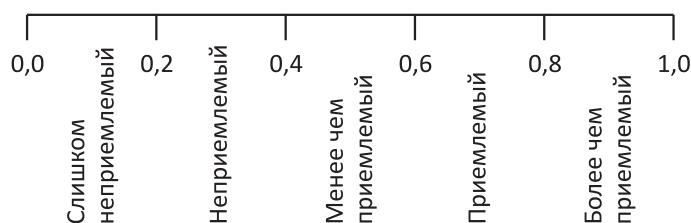


Рис. 2 Признаки показателей платежеспособности в масштабе единичного отрезка

На рис. 1 градация признаков платежеспособности представлена в общем виде¹. Тем не менее для каждого ключевого показателя устанавливаются соответствующие нормативные интервалы вида $[d_{0i}; d_{5i}]$ ($i = 1, \dots, 10$). Так, в случае заявки на получение кредита в национальной валюте со стороны ФЛ, получающего доходы в долларах США, в [4] на основании исследований, проведенных в [5, 6], такие интервалы установлены. В частности, для финансовых коэффициентов платежеспособности: K_4 (РТИ) — $[0; 0,45]$, K_5 (ОТИ) — $[0; 0,55]$, K_6 (коэффициента платежеспособности) — $[1; 2]$; для показателя K_9 (возраст) — $[18; 80]$; а для остальных ключевых показателей с учетом десятибалльной шкалы — $[0; 10]$. При этом очевидно, что простым преобразованием $t = (x - d_{0i}) / (d_{5i} - d_{0i})$, где $x \in [d_{0i}; d_{5i}]$, $t \in [0; 1]$, каждый из интервалов $[d_{0i}; d_{5i}]$ ($i = 1, \dots, 10$) можно легко свести к единичному отрезку $[0; 1]$ (рис. 2).

Итак, оценивая кредитоспособность с точки зрения ее ключевых показателей, градуированных в масштабе единичного интервала (см. рис. 2), где $d_i = 0,2i$ ($i = 0, \dots, 5$), фазсифицируем термы из левых частей правил в следующем виде:

- ПРИЕМЛЕМЫЙ (текущий и перспективный совокупный чистый доход):

$$X_1 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,6926}{u_4} + \frac{1}{u_5};$$

¹ Данная градация может быть выбрана экспертом и неравномерной, что несколько не меняет сути подхода.

– ПРИЕМЛЕМЫЙ (объем депозитных вкладов):

$$X_2 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,6926}{u_4} + \frac{1}{u_5};$$

– ПРИЕМЛЕМЫЙ (обеспечение кредита и его ликвидность):

$$X_3 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,6926}{u_4} + \frac{1}{u_5};$$

– ПРИЕМЛЕМЫЙ (финансовый коэффициент РГІ):

$$X_4 = \frac{1}{u_1} + \frac{0,6929}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,0367}{u_4} + \frac{0,0028}{u_5};$$

– ПРИЕМЛЕМЫЙ (финансовый коэффициент ОГІ):

$$X_5 = \frac{1}{u_1} + \frac{0,6929}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,0367}{u_4} + \frac{0,0028}{u_5};$$

– ПРИЕМЛЕМЫЙ (финансовый коэффициент платежеспособности):

$$X_6 = \frac{0,0006}{u_1} + \frac{0,0111}{u_2} + \frac{0,1007}{u_3} + \frac{0,4376}{u_4} + \frac{0,9123}{u_5};$$

– ПРИЕМЛЕМОЕ (общее материальное положение):

$$X_7 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,6926}{u_4} + \frac{1}{u_5};$$

– ПРИЕМЛЕМАЯ (социальная стабильность):

$$X_8 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,6926}{u_4} + \frac{1}{u_5};$$

– ПРИЕМЛЕМЫЙ (возраст):

$$X_9 = \frac{0,2301}{u_1} + \frac{0,6926}{u_2} + \frac{1}{u_3} + \frac{0,6926}{u_4} + \frac{0,2301}{u_5};$$

– ПРИЕМЛЕМАЯ (кредитная история):

$$X_{10} = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,6926}{u_4} + \frac{1}{u_5}.$$

С учетом этих формализмов нечеткие импликативные правила переформулируем так:

- e_1 : «Если $x_5 = X_5$, $x_6 = X_6$, $x_7 = X_7$ и $x_8 = X_8$, то $y = S$ »;
 e_2 : «Если $x_2 = X_2$, $x_4 = X_4$, $x_5 = X_5$, $x_6 = X_6$, $x_7 = X_7$ и $x_8 = X_8$, то $y = MS$ »;
 e_3 : «Если $x_1 = X_1$, $x_2 = X_2$, $x_3 = X_3$, $x_4 = X_4$, $x_5 = X_5$, $x_6 = X_6$, $x_7 = X_7$, $x_8 = X_8$, $x_9 = X_9$ и $x_{10} = X_{10}$, то $y = P$ »;
 e_4 : «Если $x_1 = X_1$, $x_2 = X_2$, $x_3 = X_3$, $x_5 = X_5$, $x_6 = X_6$, $x_7 = X_7$, $x_8 = X_8$ и $x_{10} = X_{10}$, то $y = VS$ »;
 e_5 : «Если $x_2 = X_2$, $x_3 = \neg X_3$, $x_4 = X_4$, $x_5 = X_5$, $x_6 = X_6$, $x_7 = X_7$, $x_8 = X_8$ и $x_9 = \neg X_9$, то $y = S$ »;
 e_6 : «Если $x_3 = \neg X_3$, $x_6 = \neg X_6$, $x_7 = \neg X_7$ и $x_{10} = \neg X_{10}$, то $y = US$ ».

Далее для левых частей правил вычислим консолидированные функции принадлежности: $\mu_{M_i}(u)$ ($i = 1, \dots, 6$). В частности, имеем:

$$e_1: \mu_{M_1}(u) = \min\{\mu_{X_5}(u), \mu_{X_6}(u), \mu_{X_7}(u), \mu_{X_8}(u)\},$$

$$M_1 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,0367}{u_4} + \frac{0,0028}{u_5};$$

$$e_2: \mu_{M_2}(u) = \min\{\mu_{X_2}(u), \mu_{X_4}(u), \mu_{X_5}(u), \mu_{X_6}(u), \mu_{X_7}(u), \mu_{X_8}(u)\},$$

$$M_2 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,0367}{u_4} + \frac{0,0028}{u_5};$$

$$e_3: \mu_{M_3}(u) = \min\{\mu_{X_1}(u), \mu_{X_2}(u), \mu_{X_3}(u), \mu_{X_4}(u), \mu_{X_5}(u), \mu_{X_6}(u), \mu_{X_7}(u), \mu_{X_8}(u), \mu_{X_9}(u), \mu_{X_{10}}(u)\},$$

$$M_3 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,0367}{u_4} + \frac{0,0028}{u_5};$$

$$e_4: \mu_{M_4}(u) = \min\{\mu_{X_1}(u), \mu_{X_2}(u), \mu_{X_3}(u), \mu_{X_5}(u), \mu_{X_6}(u), \mu_{X_7}(u), \mu_{X_8}(u), \mu_{X_{10}}(u)\},$$

$$M_4 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,2301}{u_3} + \frac{0,0367}{u_4} + \frac{0,0028}{u_5};$$

$$e_5: \mu_{M_5}(u) = \min\{\mu_{X_2}(u), 1 - \mu_{X_3}(u), \mu_{X_4}(u), \mu_{X_5}(u), \mu_{X_6}(u), \mu_{X_7}(u), \mu_{X_8}(u), 1 - \mu_{X_9}(u)\},$$

$$M_5 = \frac{0,0028}{u_1} + \frac{0,0367}{u_2} + \frac{0,0000}{u_3} + \frac{0,0367}{u_4} + \frac{0,0000}{u_5};$$

$$e_6: \mu_{M_6}(u) = \min\{1 - \mu_{X_3}(u), 1 - \mu_{X_6}(u), 1 - \mu_{X_7}(u), 1 - \mu_{X_{10}}(u)\},$$

$$M_6 = \frac{0,9972}{u_1} + \frac{0,9633}{u_2} + \frac{0,7699}{u_3} + \frac{0,3074}{u_4} + \frac{0,0000}{u_5}.$$

В итоге правила запишем в следующей, еще более компактной форме:

e_1 : «Если $x = M_1$, то $Y = S$ »;

e_2 : «Если $x = M_2$, то $Y = MS$ »;

e_3 : «Если $x = M_3$, то $Y = P$ »;

e_4 : «Если $x = M_4$, то $Y = VS$ »;

e_5 : «Если $x = M_5$, то $Y = S$ »;

e_6 : «Если $x = M_6$, то $Y = US$ ».

Для преобразования этих правил воспользуемся импликацией Лукасевича [7]:

$$\mu_H(u, j) = \min(1, 1 - \mu_M(w) + \mu_Y(j)).$$

Тогда для каждой пары $(u, j) \in U \times Y$ на $U \times Y$ получим следующие нечеткие отношения:

$$R_1 = \left[\begin{array}{c|cccccccccccc} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \hline 0,0028 & 0,9972 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,2301 & 0,7699 & 0,8699 & 0,9699 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0028 & 0,9972 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right];$$

$$R_2 = \left[\begin{array}{c|cccccccccccc} & 0 & 0,3162 & 0,4472 & 0,5477 & 0,6325 & 0,7071 & 0,7746 & 0,8367 & 0,8944 & 0,9487 & 1 \\ \hline 0,0028 & 0,9972 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,2301 & 0,7699 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0028 & 0,9972 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right];$$

$$R_3 = \left[\begin{array}{c|cccccccccccc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0,0028 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 1 \\ 0,2301 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 1 \\ 0,0028 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 1 \end{array} \right];$$

$$R_4 = \left[\begin{array}{c|cccccccccccc} & 0 & 0,01 & 0,04 & 0,09 & 0,16 & 0,25 & 0,36 & 0,49 & 0,64 & 0,81 & 1 \\ \hline 0,0028 & 0,9972 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 0,9733 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,2301 & 0,7699 & 0,7799 & 0,8099 & 0,8599 & 0,9299 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 0,9733 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0028 & 0,9972 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right];$$

$$R_5 = \left[\begin{array}{c|cccccccccccc} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \hline 0,0028 & 0,9972 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0000 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0367 & 0,9633 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,0000 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right];$$

$$R_6 = \left[\begin{array}{c|cccccccccccc} & 0 & 0,9 & 0,8 & 0,7 & 0,6 & 0,5 & 0,4 & 0,3 & 0,2 & 0,1 & 0 \\ \hline 0,9972 & 1 & 0,9028 & 0,8028 & 0,7028 & 0,6028 & 0,5028 & 0,4028 & 0,3028 & 0,2028 & 0,1028 & 0,0028 \\ 0,9633 & 1 & 0,9367 & 0,8367 & 0,7367 & 0,6367 & 0,5367 & 0,4367 & 0,3367 & 0,2367 & 0,1367 & 0,0367 \\ 0,7699 & 1 & 1 & 1 & 0,9301 & 0,8301 & 0,7301 & 0,6301 & 0,5301 & 0,4301 & 0,3301 & 0,2301 \\ 0,3074 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,9926 & 0,8926 & 0,7926 & 0,6926 \\ 0,0000 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right];$$

В результате пересечения нечетких отношений R_1, R_2, \dots, R_6 в итоге получим следующее общее функциональное решение, отражающее причинно-следственную связь между признаками платежеспособности ФЛ и уровнем его кредитоспособности:

$$R = \left[\begin{array}{c|cccccccccccc} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \hline u_1 & 0,9972 & 0,9028 & 0,8028 & 0,7028 & 0,6028 & 0,5028 & 0,4028 & 0,3028 & 0,2028 & 0,1028 & 0,0028 \\ u_2 & 0,9633 & 0,9367 & 0,8367 & 0,7367 & 0,6367 & 0,5367 & 0,4367 & 0,3367 & 0,2367 & 0,1367 & 0,0367 \\ u_3 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7699 & 0,7301 & 0,6301 & 0,5301 & 0,4301 & 0,3301 & 0,2301 \\ u_4 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,9633 & 0,8925 & 0,7926 & 0,6926 \\ u_5 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,9972 & 0,0072 & 0,9972 & 1 \end{array} \right];$$

Далее для установления уровней кредитоспособности ФЛ применим правило композиционного вывода в нечеткой среде: $E_k = G_k \circ R$, где E_k — кредитоспособность k -го уровня; G_k — отображение k -го признака платежеспособности ФЛ в виде нечеткого подмножества. Выбирая композиционное правило вида $\mu_{E_k}(j) = \max_u \{ \min(\mu_{G_k}(u), \mu_R(u)) \}$ и полагая, что

$$\mu_{G_k}(u) = \begin{cases} 0, & u \neq u_k; \\ 1, & u = u_k, \end{cases}$$

в итоге имеем

$$\mu_{E_k}(j) = \mu_R(u_k, j),$$

т. е. E_k есть k -я строка матрицы R .

Теперь для классификации уровней кредитоспособности применим процедуру дефаззификации нечетких выходов примененной модели. Итак, для оценочного понятия (в данном случае, терма) u_1 — «СЛИШКОМ НЕПРИЕМЛЕМЫЙ»,

характеризующего ключевые показатели платежеспособности ФЛ, нечеткой интерпретацией соответствующего уровня кредитоспособности будет нечеткое множество:

$$E_1 = \frac{0,9972}{0} + \frac{0,9028}{0,1} + \frac{0,8028}{0,2} + \frac{0,7028}{0,3} + \frac{0,6028}{0,4} + \frac{0,5028}{0,5} + \frac{0,4028}{0,6} + \frac{0,3028}{0,7} + \frac{0,2028}{0,8} + \frac{0,1028}{0,9} + \frac{0,0028}{1,0}.$$

Устанавливая уровневые множества $E_{1\alpha}$ и вычисляя соответствующие их мощности $M(E_{1\alpha})$ по формуле

$$M(E_{1\alpha}) = \sum_{j=1}^n \frac{x_j}{n},$$

имеем [7]:

- для $0 < \alpha < 0,0028$: $\Delta\alpha = 0,0028$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,5$;
- для $0,0028 < \alpha < 0,1028$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,45$;
- для $0,1028 < \alpha < 0,2028$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,40$;
- для $0,2028 < \alpha < 0,3028$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,35$;
- для $0,3028 < \alpha < 0,4028$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,30$;
- для $0,4028 < \alpha < 0,5028$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,25$;
- для $0,5028 < \alpha < 0,6028$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,20$;
- для $0,6028 < \alpha < 0,7028$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,15$;
- для $0,7028 < \alpha < 0,8028$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,10$;
- для $0,8028 < \alpha < 0,9028$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,05$;
- для $0,9028 < \alpha < 0,9972$: $\Delta\alpha = 0,0944$, $E_{1\alpha} = \{0\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,00$.

Для нахождения точечных оценок нечетких выходов E_k воспользуемся равенством:

$$F(E_k) = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M(E_{k\alpha}) d\alpha \quad (k = 1, \dots, 5),$$

где α_{\max} — максимальное значение на E_k [7]. В данном случае имеем:

$$F(E_1) = \frac{1}{0,9972} \int_0^{0,9972} M(E_{1\alpha}) d\alpha = (0,5 \cdot 0,0028 + 0,45 \cdot 0,1 + 0,40 \cdot 0,1 + 0,35 \cdot 0,1 + 0,30 \cdot 0,1 + 0,25 \cdot 0,1 + 0,20 \cdot 0,1 + 0,15 \cdot 0,1 + 0,10 \cdot 0,1 + 0,05 \cdot 0,1 + 0 \cdot 0,0944) = 0,2270.$$

Аналогичными действиями устанавливаем точечные оценки и для остальных выходов:

- для оценочного понятия u_2 — «НЕПРИЕМЛЕМЫЙ» — $F(E_2) = 0,2526$;
- для оценочного понятия u_3 — «МЕНЕЕ ЧЕМ ПРИЕМЛЕМЫЙ» — $F(E_3) = 0,3871$;
- для оценочного понятия u_4 — «ПРИЕМЛЕМЫЙ» — $F(E_4) = 0,4734$;
- для оценочного понятия u_5 — «БОЛЕЕ ЧЕМ ПРИЕМЛЕМЫЙ» — $F(E_5) = 0,5014$.

В результате в принятых допущениях итоговая шкала для оценки уровня кредитоспособности ФЛ может выглядеть так, как это показано на рис. 3.

По существу, значение 0,2270, являющееся наименьшим дефазсифицированным выходом нечеткой модели многокритериальной оценки нечеткого уровня кредитоспособности «ЧЕРЕСЧУР НИЗКИЙ», как верхняя граница соответствует оценочному понятию u_1 — «СЛИШКОМ НЕПРИЕМЛЕМЫЙ», характеризующему ключевые показатели платежеспособности ФЛ.

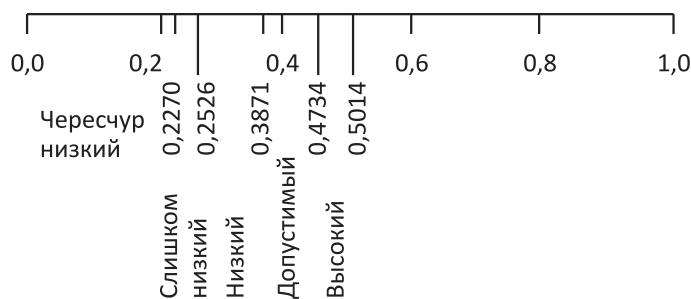


Рис. 3 Шкала градаций уровня кредитоспособности

Аналогичным образом имеем:

- 0,2526 является верхней границей оценки «СЛИШКОМ НИЗКИЙ»;
- 0,3871 является верхней границей оценки «НИЗКИЙ»;
- 0,4734 является верхней границей оценки «ДОПУСТИМЫЙ»;
- 0,5014 является верхней границей оценки «ВЫСОКИЙ».

4 Оценка кредитоспособности физического лица

Для проведения комплексной персональной оценки кредитоспособности конкретного ФЛ за основу выберем рассуждения, которые конструктивно аналогичны формулировкам правил e_1-e_6 , а именно:

- c_1 : «Если ФЛ как потенциальный заемщик характеризуется только низким финансовым коэффициентом ОТИ и низким коэффициентом платежеспособности, а также высоким состоянием материального положения и высоким уровнем социальной стабильности, то уровень его кредитоспособности является высоким»;
- c_2 : «Если к тому же у ФЛ объем депозитных вкладов высокий, а финансовый коэффициент РТИ является низким, то уровень его кредитоспособности является более чем высоким»;
- c_3 : «Если дополнительно к тому, что оговорено в c_2 , текущий и перспективный совокупный чистый доход высокий, показатель обеспечения кредита и его ликвидности высокий, возраст и кредитная история ФЛ подходящие, то уровень кредитоспособности ФЛ является чересчур высоким»;
- c_4 : «Если имеет место все, что оговорено в c_3 , за исключением информации о финансовом коэффициенте РТИ и возрасте ФЛ, то уровень кредитоспособности ФЛ является очень высоким»;
- c_5 : «Если объем депозитных вкладов ФЛ высокий, его характеризуют низкие финансовые коэффициенты РТИ и ОТИ и высокий коэффициент платежеспособности, а также высокие уровни общего материального положения и социальной стабильности, но при этом обеспечение кредита и его ликвидность низкие, а возраст ФЛ является неприемлемым, то уровень кредитоспособности ФЛ все же является высоким»;
- c_6 : «Если у заявителя показатель обеспечения кредита и его ликвидности, финансовый коэффициент платежеспособности, показатель общего материального положения являются низкими, а кредитная история является неподходящей, то уровень кредитоспособности ФЛ является низким».

Разница только в том, что, если в предыдущем случае фаззификация термов из левых частей правил e_1-e_6 осуществлялась на базе признаков платежеспособности, т. е. опорного вектора $(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$, а термы из правых частей на

базе дискретного множества $\{0; 0,1; 0,2; \dots; 1\}$, то теперь их описание будет осуществляться с помощью нечетких подмножеств континуума $[0; 1]$ с применением гауссовской функции принадлежности вида (1), причем для каждого ключевого показателя платежеспособности ФЛ данный универсум будет иметь свое смысловое значение, зависящее от соответствующего ему нормативного интервала.

Итак, запишем приведенные рассуждения в терминах входных и выходной лингвистических переменных следующим образом:

- c_1 : «Если $K_5 = \text{НИЗКИЙ}$, $K_6 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_7 = \text{ВЫСОКОЕ}$ и $K_8 = \text{ВЫСОКАЯ}$, то $Y = \text{ВЫСОКИЙ}$ »;
- c_2 : «Если $K_2 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_4 = \text{НИЗКИЙ}$, $K_5 = \text{НИЗКИЙ}$, $K_6 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_7 = \text{ВЫСОКОЕ}$ и $K_8 = \text{ВЫСОКАЯ}$, то $Y = \text{БОЛЕЕ ЧЕМ ВЫСОКИЙ}$ »;
- c_3 : «Если $K_1 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_2 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_3 = \text{ВЫСОКОЕ}$, $K_4 = \text{НИЗКИЙ}$, $K_5 = \text{НИЗКИЙ}$, $K_6 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_7 = \text{ВЫСОКОЕ}$, $K_8 = \text{ВЫСОКАЯ}$, $K_9 = \text{ПРИЕМЛЕМЫЙ}$ и $K_{10} = \text{ПОДХОДЯЩАЯ}$, то $Y = \text{ЧЕРЕСЧУР ВЫСОКИЙ}$ »;
- c_4 : «Если $K_1 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_2 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_3 = \text{ВЫСОКОЕ}$, $K_5 = \text{НИЗКИЙ}$, $K_6 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_7 = \text{ВЫСОКОЕ}$, $K_8 = \text{ВЫСОКАЯ}$ и $K_{10} = \text{ПОДХОДЯЩАЯ}$, то $Y = \text{ОЧЕНЬ ВЫСОКИЙ}$ »;
- c_5 : «Если $K_2 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_3 = \text{НЕВЫСОКОЕ}$, $K_4 = \text{НИЗКИЙ}$, $K_5 = \text{НИЗКИЙ}$, $K_6 = \text{ВЫСОКИЙ}$, $K_7 = \text{ВЫСОКОЕ}$, $K_8 = \text{ВЫСОКАЯ}$ и $K_9 = \text{НЕПРИЕМЛЕМЫЙ}$, то $Y = \text{ВЫСОКИЙ}$ »;
- c_6 : «Если $K_3 = \text{НЕВЫСОКИЙ}$, $K_6 = \text{НЕВЫСОКИЙ}$, $K_7 = \text{НЕВЫСОКОЕ}$ и $K_{10} = \text{НЕПОДХОДЯЩАЯ}$, то $Y = \text{НЕВЫСОКИЙ}$ ».

Теперь предположим, что банк рассматривает 5 потенциальных заемщиков a_1 , a_2 , a_3 , a_4 и a_5 , получающих свои доходы в долларах США, на предмет предоставления им кредитов в национальной валюте. Предварительный анализ их заявок позволил упорядочить соответствующие данные ключевых показателей в виде табл. 1 [4]¹.

Рассчитав финансовые коэффициенты РТИ (K_4), ОТИ (K_5) и коэффициент платежеспособности (K_6) по методике, представленной в [4–6], получим обновленные списки данных ФЛ, которые сведены в табл. 2.

Теперь, чтобы унифицировать нормативные интервалы, простым преобразованием $t = (x - a)/(b - a)$, где $x \in [a; b]$, $t \in [0; 1]$, представим данные из табл. 2 в масштабе единичного отрезка (табл. 3).

Реализация правил c_1 – c_6 в нотации MATLAB\Fuzzy Inference System дала следующие результаты оценки кредитоспособности рассматриваемых альтернативных ФЛ: для a_1 — 0,356; для a_2 — 0,307; для a_3 — 0,463; для a_4 —

¹Представленные данные взяты из примера, рассмотренного в [4], чтобы провести конечное сравнение альтернативных подходов оценки.

Таблица 1 Количественные и качественные показатели платежеспособности ФЛ

№	Показатели платежеспособности	Альтернативные заемщики кредитов				
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	Текущий и перспективный совокупный чистый доход, \$	280	340	370	310	280
2	Объем депозитных вкладов	6	8	5	4	9
3	Обеспечение кредита и его ликвидность	2	5	7	9	8
4	Сумма ежемесячных платежей по кредиту (P_m), \$	180	260	310	210	240
5	Сумма ежемесячных доходов (I_m), \$	600	750	810	670	560
6	Сумма финансовых обязательств (O_m), \$	320	410	440	360	280
7	Общее материальное положение	7	6	9	8	7
8	Социальная стабильность	10	8	6	8	7
9	Возраст, лет	28	39	55	64	47
10	Кредитная история	5	4	8	9	6

Таблица 2 Обновленные данные платежеспособности альтернативных заемщиков

У/о	Критерии оценки	Альтернативные заемщики кредитов					Нормативный интервал
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
K_1	Текущий и перспективный совокупный чистый доход, \$	280	340	370	310	280	[0; 1000]
K_2	Объем депозитных вкладов ¹	6	8	5	4	9	[0; 10]
K_3	Обеспечение кредита и его ликвидность	2	5	7	9	8	[0; 10]
K_4	РТИ	0,3000	0,3467	0,3827	0,3134	0,4286	[0; 0,45]
K_5	ОТИ	0,5333	0,5467	0,5432	0,5373	0,5000	[0; 0,55]
K_6	Платежеспособность	1,2000	1,1194	1,0800	1,1754	1,0769	[1; 2]
K_7	Общее материальное положение	7	6	9	8	7	[0; 10]
K_8	Социальная стабильность	10	8	6	8	7	[0; 10]
K_9	Возраст, лет	28	39	55	64	47	[18; 80]
K_{10}	Кредитная история	5	4	8	9	6	[0; 10]

¹Этот и показатели K_3 , K_7 , K_8 и K_{10} хоть и могут в некоторых случаях иметь числовую природу (например, денежный эквивалент), однако их реальные значения все же бывают усредненными или «размытыми», т. е., по существу, слабо структурированными. Поэтому на экспертном уровне их целесообразно предварительно оценивать по 10-балльной шкале.

0,5; для a_5 — 0,405. Согласно этим результатам наилучшим для кредитования является ФЛ a_4 , имеющее наивысшую оценку 0,5. Согласно установленной в предыдущем разделе классификации данному ФЛ присваивается высокий уровень платежеспособности. Оценки остальным потенциальным заемщикам даются по убыванию: ФЛ a_3 (0,462) и ФЛ a_5 (0,405) — с допустимым уров-

Таблица 3 Данные показателей платежеспособности альтернативных заемщиков в масштабе единичного отрезка

У/о	Критерии оценки	Альтернативные заемщики кредитов					Нормативный интервал
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
K_1	Текущий и перспективный совокупный чистый доход	0,28	0,34	0,37	0,31	0,28	[0; 1]
K_2	Объем депозитных вкладов	0,6	0,8	0,5	0,4	0,9	[0; 1]
K_3	Обеспечение кредита и его ликвидность	0,2	0,5	0,7	0,9	0,8	[0; 1]
K_4	РТИ	0,0667	0,0770	0,0850	0,0696	0,0952	[0; 1]
K_5	ОТИ	0,0970	0,0994	0,0988	0,0977	0,0909	[0; 1]
K_6	Платежеспособность	0,2000	0,1194	0,0800	0,1754	0,0769	[0; 1]
K_7	Общее материальное положение	0,7	0,6	0,9	0,8	0,7	[0; 1]
K_8	Социальная стабильность	1	0,8	0,6	0,8	0,7	[0; 1]
K_9	Возраст	0,1613	0,3387	0,5968	0,7419	0,4677	[0; 1]
K_{10}	Кредитная история	0,5	0,4	0,8	0,9	0,6	[0; 1]

нем платежеспособности; ФЛ a_1 (0,356) и ФЛ a_2 (0,307) — с низким уровнем платежеспособности.

5 Заключение

Предложен нечеткий подход к оценке кредитоспособности ФЛ на основании комплексной обработки доступной информации, характеризуемой объективными и субъективными признаками его финансовой стабильности. В поддержку этому на предварительной стадии исследования осуществлена классификация уровней финансовой стабильности ФЛ с применением метода нечеткого логического вывода. При этом примечательным является тот факт, что полученный в статье ранжированный по уровням кредитоспособности список альтернатив (ФЛ) полностью повторяет тот, что был получен авторами в [4] посредством применения другого нечеткого метода.

Литература

1. *Пятковский О. И.* Скоринговая система оценки кредитоспособности физических лиц на основе гибридных экспертных систем // Ползуновский альманах, 2008. № 8. С. 127–129.
2. Основные методы оценки кредитоспособности заемщика. http://www.realtypress.ru/article/article_901.html.

3. Решения для скоринга и скоринговых оценок компании FICO/FICO Score 9. <http://bankcreditcard.ru/fico-score>.
4. Рзаев Р. Р., Алиев А. А. Оценивание кредитоспособности физических лиц с применением нечеткой логики // Проблемы управления и информатики, 2017. № 1. С. 56–72.
5. Оценка кредитоспособности физического лица на основе финансовых показателей его платежеспособности. <http://www.elitarium.ru/ocenka-kreditosposobnost-zaemshhik-kredit-bank-kojefficient-procent-metodika>.
6. Ефимов А. М. Современные методы оценки кредитоспособности физических лиц // Банковский ритейл, 2010. № 2. С. 19–26.
7. Рзаев Р. Р. Интеллектуальный анализ данных в системах поддержки принятия решений. — Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. Kg, 2013. 130 с.

Поступила в редакцию 13.01.17

CREDIT RATING OF A PHYSICAL PERSON BASED ON FUZZY ANALYSIS OF HIS/HER SOLVENCY

R. R. Rzayev¹ and A. A. Aliyev²

¹Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, 9 B. Vahabzadeh Str., Baku AZ1141, Azerbaijan Republic

²Baku State University, 23 Zakhid Khalilov Str., Baku AZ1148, Azerbaijan Republic

Abstract: The paper describes a fuzzy approach to credit rating of a physical person based on complex processing of available information characterized by objective and subjective attributes of the person's financial stability. In the preliminary stage of the study, the classification of levels of financial stability of physical persons was carried out using a fuzzy inference system.

Keywords: physical person; solvency ratio; fuzzy set; fuzzy relation; fuzzy conclusion

DOI: 10.14357/08696527170316

References

1. Piatkovskii, O. I. 2008. Skoringovaya sistema otsenki kreditosposobnosti fizicheskikh lits na osnove gibridnykh ekspertnykh sistem [The scoring system of credit rating of a physical person on the basis of hybrid expert systems]. *Polzunovskiy al'manakh* [Polzunov Almanac] 8:127–129.
2. Osnovnye metody otsenki kreditosposobnosti [Basic methods of credit rating of a borrower]. Available at: http://www.realtypress.ru/article/article_901.html (accessed August 11, 2017).

3. Resheniya dlya skoringa i skoringovykh otsenok kompanii FICO/FICO Score 9 [Solutions for scoring and scoring assessments of FICO/FICO Score 9 company]. Available at: <http://bankcreditcard.ru/fico-score/> (accessed August 11, 2017).
4. Rzayev, R. R., and A. A. Aliyev. 2017. Estimation of credit borrowers solvency using fuzzy logic. *J. Automat. Inf. Sci.* 49(2):70–84.
5. Otsenka kreditosposobnosti fizicheskogo litsa na osnove finansovykh pokazateley ego platezhnesposobnosti [Credit rating of the physical person based on the financial performance of its solvency]. Available at: <http://www.elitarium.ru/ocenka-kreditosposobnost-zaemshhik-kredit-bank-kojefficient-procent-metodika/> (accessed August 11, 2017).
6. Efimov, A. M. 2010. Sovremennye metody otsenki kreditosposobnosti fizicheskikh lits [Modern methods of credit rating of physical persons]. *Bankovskii riteil* [Bank Retail] 2:19–26.
7. Rzayev, R. R. 2013. *Intellektual'nyy analiz dannykh v sistemakh podderzhki priniatiya resheniy* [Intellectual analysis in decision support systems]. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. Kg. 130 p.

Received January 13, 2017

Contributors

Rzayev Ramin R. (b. 1961) — Doctor of Science in technology, Professor, principal scientist, Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, 9 B. Vahabzadeh Str., Baku AZ1141, Azerbaijan Republic; raminrza@yahoo.com

Aliyev Aliagha A. (b. 1991) — doctorate student, Baku State University, 23 Zakhid Khalilov Str., Baku AZ1148, Azerbaijan; aliagha.aliyev@gmail.com

ОБ АВТОРАХ

Алиев Алиага Алекпер оглы (р. 1991) — докторант кафедры информационных технологий и программирования Бакинского государственного университета

Бочкарев Артем Максимович (р. 1994) — студент Московского физико-технического института

Грушо Александр Александрович (р. 1946) — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Губайдуллин Ирек Марсович (р. 1959) — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нефтехимии и катализа Российской академии наук; профессор Уфимского государственного нефтяного технического университета

Дулин Сергей Константинович (р. 1950) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Дулина Наталья Георгиевна (р. 1947) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Егоров Владимир Борисович (р. 1948) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Еникеев Марат Рустемович (р. 1989) — аспирант лаборатории математической химии Института нефтехимии и катализа Российской академии наук

Забжайло Михаил Иванович (р. 1956) — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Захарова Татьяна Валерьевна (р. 1962) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник Института проблем информа-

тики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Зацман Игорь Моисеевич (р. 1952) — доктор технических наук, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Зейфман Александр Израилевич (р. 1954) — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Вологодского государственного университета; старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; главный научный сотрудник Института социально-экономического развития территории Российской академии наук

Ильин Александр Владимирович (р. 1975) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Ильин Владимир Дмитриевич (р. 1937) — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кантор Ольга Геннадиевна (р. 1971) — кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института социально-экономических исследований Уфимского научного центра Российской академии наук

Кириков Игорь Александрович (р. 1955) — кандидат технических наук, директор Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Киселева Ксения Михайловна (р. 1992) — аспирантка Вологодского государственного университета; младший научный сотрудник Российского университета дружбы народов

Колесников Александр Васильевич (р. 1948) — доктор технических наук, профессор Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта; старший научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Королев Виктор Юрьевич (р. 1954) — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М. В. Ломоносова; ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Коротышева Анна Владимировна (р. 1988) — кандидат физико-математических наук, доцент Вологодского государственного университета

Кудрявцев Алексей Андреевич (р. 1978) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова;

Листопад Сергей Викторович (р. 1984) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Малеева Марина Алексеевна (р. 1982) — кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории коррозии металлов в природных условиях Института физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук

Минин Владимир Александрович (р. 1941) — доктор физико-математических наук, консультант Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Разумчик Ростислав Валерьевич (р. 1984) — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; доцент Российского университета дружбы народов

Рзаев Рамин Рза оглы (р. 1961) — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института систем управления Национальной академии наук Азербайджана

Румовская София Борисовна (р. 1985) — программист I категории Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук.

Сатин Яков Александрович (р. 1978) — кандидат физико-математических наук, доцент Вологодского государственного университета

Синицын Игорь Николаевич (р. 1940) — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Сливкина Анна Владимировна (р. 1995) — студентка кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Смирнов Дмитрий Владимирович (р. 1984) — бизнес-партнер по информационным технологиям департамента безопасности ПАО «Сбербанк России»

Софронов Иван Львович (р. 1957) — доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института

Спивак Семён Израилевич (р. 1945) — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Башкирского государственного университета

Стрижов Вадим Викторович (р. 1967) — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Талипова Регина Римовна (р. 1971) — кандидат химических наук, научный сотрудник Института нефтехимии и катализа Российской академии наук

Терёхина Ирина Юрьевна (р. 1994) — студентка магистратуры факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Тимонина Елена Евгеньевна (р. 1952) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Федюшин Илья Андреевич (р. 1997) — студент факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Хавансков Валерий Александрович (р. 1950) — научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Шестаков Олег Владимирович (р. 1976) — доктор физико-математических наук, доцент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Шоргин Сергей Яковлевич (р. 1952) — доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН); главный научный сотрудник Института проблем информатики ФИЦ ИУ РАН

Шубников Сергей Константинович (р. 1955) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Якушев Дмитрий Алексеевич (р. 1965) — кандидат технических наук, начальник отдела Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте

Правила подготовки рукописей статей для публикации в журнале «Системы и средства информатики»

Журнал «Системы и средства информатики» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информационных технологий.

Журнал издается на русском языке. По специальному решению редколлегии отдельные статьи могут печататься на английском языке.

Тематика журнала охватывает следующие направления:

- информационно-телекоммуникационные системы и средства их построения;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и сетей;
- методы и средства защиты информации.

1. В журнале печатаются статьи, содержащие результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях.

Публикация предоставленной автором(ами) рукописи не должна нарушать положений глав 69, 70 раздела VII части IV Гражданского кодекса, которые определяют права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации, в том числе авторские права, в РФ.

Ответственность за нарушение авторских прав, в случае предъявления претензий к редакции журнала, несут авторы статей.

Направляя рукопись в редакцию, авторы сохраняют свои права на данную рукопись и при этом передают учредителям и редколлегии журнала неисключительные права на издание статьи на русском языке (или на языке статьи, если он отличен от русского) и на перевод ее на английский язык, а также на ее распространение в России и за рубежом. Каждый автор должен представить в редакцию подписанный с его стороны «Лицензионный договор о передаче неисключительных прав на использование произведения», текст которого размещен по адресу <http://www.ipiran.ru/publications/licence.doc>. Этот договор может быть представлен в бумажном (в 2-х экз.) или в электронном виде (отсканированная копия заполненного и подписанного документа).

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности публикации представленной статьи в открытой печати.

2. К статье прилагаются данные автора (авторов) (см. п. 8). При наличии нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией.
3. Редакция журнала осуществляет экспертизу присланных статей в соответствии с принятой в журнале процедурой рецензирования.

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.

4. Решение редколлегии о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редакции должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или L^AT_EX (.tex), дополнительно — в формате .pdf, на дискете, лазерном диске или электронной почтой. Предоставление бумажной рукописи необязательно.
7. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки.

Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху и снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3.
Основной текст: стиль — «Обычный», шрифт — Times New Roman, размер — 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине.
Рекомендуемый объем рукописи — не свыше 15 страниц указанного формата. При превышении указанного объема редколлегия вправе потребовать от автора сокращения объема рукописи.
Сокращения слов, помимо стандартных, не допускаются. Допускается минимальное количество аббревиатур.
Все страницы рукописи нумеруются.
Шаблоны примеров оформления представлены в Интернете:
<http://www.ipiran.ru/publications/collected/template.doc>
8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:
 - название статьи;
 - Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
 - место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
 - сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_rus/authors.asp и
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_eng/authors.asp;
 - аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
 - ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами.
 - источники финансирования работы (ссылка на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.)
9. Требования к спискам литературы.

Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в каждом из списков литературы в порядке первых упоминаний.

Списки литературы представляются в двух вариантах:

- (1) **Список литературы к русскоязычной части.** Русские и английские работы — на языке и в алфавите оригинала.
- (2) **References.** Русские работы и работы на других языках — в латинской транслитерации с переводом на английский язык; английские работы и работы на других языках — на языке оригинала.

Необходимо для составления списка “References” пользоваться размещенной на сайте <http://www.translit.net/ru/bgn/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу.

Список литературы “References” приводится полностью отдельным блоком, повторяя все позиции из списка литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы к русскоязычной части есть ссылки на иностранные публикации, набранные латиницей, они полностью повторяются в списке “References”.

Примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”:

Описание статьи из журнала:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926-930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Описание материалов конференций:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Описание переводной книги (в списке литературы к русскоязычной части необходимо указать: / Пер. с англ. — после названия книги, а в конце ссылки указать оригинал книги в круглых скобках):

1. В русскоязычной части:
Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (*Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. Vibration problems in engineering. — 4th ed. — N.Y.: Wiley, 1974. 521 p.*)

2. В англоязычной части:

Timoshenko, S. P., D. H. Young, and W. Weaver. 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. N.Y.: Wiley. 521 p.

Описание неопубликованного документа:

Latypov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004. Geology and production (NGT GiD). Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198. (In Russian, unpubl.)

Описание интернет-ресурса:

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov, V. I. 2003. Matematicheskoe modelirovaniye plazmy v sisteme kompaktny tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. D.Sc. Diss. Moscow. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovary informatzionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

Описание ГОСТа:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow: Standardinform Pubs. 10 p.

Описание патента:

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

10. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.
11. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:
 - указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
 - использовать attach (присоединение);
 - в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.
12. Журнал «Системы и средства информатики» является некоммерческим изданием. Плата за публикацию не взимается, гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции журнала «Системы и средства информатики»:

Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ФИЦ ИУ РАН
Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05
e-mail: rust@ipiran.ru (Сейфуль-Мулюков Рустем Бадриевич)
<http://www.ipiran.ru/journal/collected>

Requirements for manuscripts submitted to Journal “Systems and Means of Informatics”

Journal “Systems and Means of Informatics” publishes theoretical, review, and discussion articles on the research and development in the field of information technology.

The journal is published in Russian. By a special decision of the editorial board, some articles can be published in English.

Topics covered include the following areas:

- information and communication systems and tools of their design;
 - architecture and software of computational complexes and networks; and
 - methods and tools of information protection.
1. The Journal publishes original articles which have not been published before and are not intended for simultaneous publication in other editions. An article submitted to the Journal must not violate the Copyright law. Sending the manuscript to the Editorial Board, the authors retain all rights of the owners of the manuscript and transfer the nonexclusive rights to publish the article in Russian (or the language of the article, if not Russian) and its distribution in Russia and abroad to the Founders and the Editorial Board. Authors should submit a letter to the Editorial Board in the following form:

Agreement on the transfer of rights to publish:

“We, the undersigned authors of the manuscript “. . . ,” pass to the Founder and the Editorial Board of the Journal “Systems and Means of Informatics” the nonexclusive right to publish the manuscript of the article in Russian (or in English) in both print and electronic versions of the Journal. We affirm that this publication does not violate the Copyright of other persons or organizations.

Author(s) signature(s): (name(s), address(es), date).”

This agreement should be submitted in paper form or in the form of a scanned copy (signed by the authors).

The Editorial Board has the right to request from the authors an official expert conclusion that the submitted article has no classified data prohibited for publication.

2. A submitted article should be attached with **the data on the author(s)** (see item 8). If there are several authors, the contact person should be indicated who is responsible for correspondence with the Editorial Board and other authors about revisions and final approval of the proofs.
3. The Editorial Board of the Journal examines the article according to the established reviewing procedure. If authors receive their article for correction after reviewing, it does not mean that the article is approved to be published. The corrected article should be sent to the Editorial Board for the subsequent review and approval.
4. The decision on the article publication or its rejection is communicated to the authors. The Editorial Board may also send the reviews on the submitted articles to the authors. Any discussion upon the rejected articles is not possible.
5. The edited articles will be sent to the authors for proofread. The comments of the authors to the edited text of the article should be sent to the Editorial Board as soon as possible.
6. The manuscript of the article should be presented electronically in the MS WORD (.doc or .docx) or L^AT_EX (.tex) formats, and additionally in the .pdf format. All documents

may be sent by e-mail or provided on a CD or diskette. A hard copy submission is not necessary.

7. The recommended typesetting instructions for manuscript.

Pages parameters: format A4, portrait orientation, document margins (cm): left — 2.5, right — 1.5, above — 2.0, below — 2.0, footer 1.3.

Text: font — Times New Roman, font size — 14, paragraph indent — 0.5, line spacing — 1.5, justified alignment.

The recommended manuscript size: not more than 15 pages of the specified format. If the specified size exceeded, the editorial board is entitled to require the author to reduce the manuscript.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site:

<http://www.ipiran.ru/publication/collected/template.doc>

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012.22.02_rus/authors.asp and
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012.22.02_eng/authors.asp;
- abstract (not less than 100 words) both in Russian and in English. Abstract is a short summary of the article that can be published separately. The abstract is the main source of information on the article and it could be included in leading information systems and data bases. The abstract in English has to be an original text and should not be an exact translation of the Russian one. Good English is required. In abstracts, avoid references and formulae.
- Indexing is performed on the basis of keywords. The use of keywords from the internationally accepted thematic Thesauri is recommended.
Important! Keywords must not be sentences.
- Acknowledgments.

9. References. Russian references have to be presented both in English translation and in Latin transliteration (refer <http://www.translit.net/ru/bgn/>).

Please take into account the following examples of Russian references appearance:

Article in journal:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Journal article in electronic format:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B.P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic

exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Conference proceedings:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Books and other monographs:

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogenera-torov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Dissertation and Thesis:

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovary informat-sionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

State standards and patents:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. M.: Standardinform Publs. 10 p.

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

References in Latin transcription are presented in the original language.

References in the text are numbered according to the order of their first appearance; the number is placed in square brackets. All items from the reference list should be cited.

10. Manuscripts and additional materials are not returned to Authors by the Editorial Board.
11. Submissions of files by e-mail must include:
 - the journal title and author's name in the "Subject" field;
 - an article and additional materials have to be attached using the "attach" function;
 - an electronic version of the article should contain the file with the text and a separate file with figures.
12. "System and Means of Informatics" journal is not a profit publication. There are no charges for the authors as well as there are no royalties.

Editorial Board address:

FRC CSC RAS, 44, block 2, Vavilov Str., Moscow 119333, Russia

Ph.: +7 (499) 135 86 92, Fax: +7 (495) 930 45 05

e-mail: rust@ipiran.ru (to Prof. Rustem Seyful-Mulyukov)

http://www.ipiran.ru/english/journal_systems.asp

SYSTEMS AND MEANS OF INFORMATICS (SISTEMY I SREDSTVA INFORMATIKI)

SCIENTIFIC JOURNAL

Volume 27 No.3 Year 2017

Editor-in-Chief and Chair of Editorial Council

Academician I. A. Sokolov

IN THIS ISSUE:

ABOUT COMPLEX AUTHENTICATION <i>A. A. Grusho, M. I. Zabezhailo, D. V. Smirnov, and E. E. Timonina</i>	4
CONSISTENCY ANALYSIS OF SOFTWARE-DEFINED NETWORKS RECONFIGURATION <i>A. A. Grusho and I. Yu. Teryokhina</i>	12
ANALYTICAL MODELING OF NORMAL PROCESSES IN STOCHASTIC SYSTEMS WITH INTEGRAL NONLINEARITIES (II) <i>I. N. Sinitsyn</i>	23
TRUNCATION BOUNDS FOR A CLASS OF INHOMOGENEOUS BIRTH AND DEATH QUEUEING MODELS WITH ADDITIONAL TRANSITIONS <i>A. I. Zeifman, A. V. Korotysheva, Ya. A. Satin, K. M. Kiseleva, R. V. Razumchik, V. Yu. Korolev, and S. Ya. Shorgin</i>	37
LOCAL RECONSTRUCTION OF TOMOGRAPHIC IMAGES IN PARALLEL AND FAN-BEAM SCANNING SCHEMES <i>A. A. Kudryavtsev, O. V. Shestakov, and I. A. Fedushin</i>	52
PREDICTION OF LATE POSTOPERATIVE COMPLICATIONS BASED ON THE RESULTS OF DISCRIMINANT AND CORRELATION ANALYSES OF THE EARLY POSTOPERATIVE GLYCEMIA CHARACTERISTICS <i>T. V. Zakharova and A. V. Slivkina</i>	63
GENERATION OF EXPERTLY-INTERPRETED MODELS FOR PREDICTION OF CORE PERMEABILITY <i>A. M. Bochkarev, I. L. Sofronov, and V. V. Strijov</i>	74
SOME IMPLICIT ISSUES OF NETWORK VIRTUALIZATION <i>V. B. Egorov</i>	88