

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. Никиulin (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. Синицын

проф., д.ф.-м.н. Л. А. Калиниченко проф., д.т.н. И. Н. Синицын

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 № 4 Год 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Об управлении размером очереди в системе с одним сервером М. Г. Коновалов, Р. В. Разумчик	4
Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с интегральными нелинейностями (III) И. Н. Синицын	16
О рандомизации в методе группового среднего при оценивании эффективной пропускной способности высокоответственных систем К. А. Калинина, Е. В. Морозов	37
Байесовская рекуррентная модель роста надежности: априорные плотности полиномиального вида А. А. Кудрявцев, С. И. Палионная	54
Стратегии распределения радиоресурсов в гетерогенных сетях с трафиком Narrow-Band IoT В. О. Бегишев, А. К. Самуйлов, Д. А. Молчанов, К. Е. Самуйлов	64
Оптимальное управление запасом непрерывного продукта в схеме регенерации с детерминированной задержкой поставки и периодом реального пополнения П. В. Шнурков, Е. Ю. Пименова	80
Архитектура инструментального средства разработки функциональных гибридных интеллектуальных систем с гетерогенным визуальным полем А. В. Колесников, С. В. Листопад	95
Эффективное использование программируемых графических процессоров в задачах молекулярно-динамического моделирования С. А. Семенов, Д. Л. Ревизников	109

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 27 № 4 Год 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Особенности подготовки информационно-аналитического продукта средствами сегментированного ситуационного центра

А. А. Зацаринный, В. И. Королёв **122**

Классификация уязвимостей интегрированных систем управления на ранних стадиях жизненного цикла

А. П. Сучков **132**

Запреты вероятностных мер в задаче поиска инсайдера

Е. А. Мартынов **144**

Влияние ошибок пользователей на динамику качества семантической сети

И. М. Адамович, О. И. Волков **150**

Методы анализа частотности моделей перевода коннекторов и обратимость генерализации статистических данных

И. М. Зацман, М. Г. Кружков, Е. Ю. Лощилова **164**

Особенности реализации сервиса «Персональная телемедицина»

Г. Я. Илюшин, В. И. Лиманский **177**

Ситуационная информатизация жизнедеятельности: модель объекта

А. В. Ильин, В. Д. Ильин **187**

Об авторах **197**

Авторский указатель за 2017 г. **200**

2017 Author Index **206**

Правила подготовки рукописей статей **211**

Requirements for manuscripts **215**

ОБ УПРАВЛЕНИИ РАЗМЕРОМ ОЧЕРЕДИ В СИСТЕМЕ С ОДНИМ СЕРВЕРОМ*

М. Г. Коновалов¹, Р. В. Разумчик²

Аннотация: Статья посвящена актуальной тематике активного управления очередью в системах обслуживания. Предложен подход к повышению эффективности стратегий ограничения доступа, основанных на использовании так называемой функции сброса. Задействованы три изменения в конструкции функции сброса: рандомизация параметров, отказ от структурирования и учет наблюдений за временем выполнения заданий. Методика демонстрируется на примере распространенного семейства алгоритмов RED и системы массового обслуживания $G/G/1/N$. Построены конструкции трех новых семейств алгоритмов, в которых последовательно реализованы одно, два и все три указанных изменения. Приведены результаты численных экспериментов для различных интенсивностей входного потока, которые показали, что эффективность новых стратегий управления размером очереди, определяемая в терминах вероятности потерь и средней длины очереди, превосходит показатели алгоритмов RED и увеличивается по мере усложнения стратегии.

Ключевые слова: активное управление очередью; алгоритмы ограничения доступа; функция сброса

DOI: 10.14357/08696527170401

1 Введение

Аналитическим и прикладным работам по изучению эффективности механизмов управления очередями (Active Queue Management, далее – AQM-механизмы) в сетевых, производственных, вычислительных и других системах уделялось и продолжает уделяться значительное внимание исследователей. Судя по публикациям в научной печати, по этому вопросу уже накоплен большой объем научных знаний (включая разнообразные модели механизмов) и некоторый опыт применения на практике (см., например, [1–4]). Исторически AQM-механизмы чаще всего появлялись в контексте сетей связи, поскольку, по-видимому, именно в этой практической области впервые потребовались систематические решения

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 15-07-03406).

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

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Российский университет дружбы народов, rrazumchik@ipiran.ru

для устранения и контроля перегрузок, поэтому далее будем придерживаться «исторического» взгляда на проблему и пользоваться «сетевой» терминологией.

Анализируя свидетельства о том, что практика отстает от теории, приведенные в [5], авторы RFC 7567 международного комитета IETF выработали рекомендации по актуальным направлениям дальнейших исследований AQM-механизмов (см. [5, разд. 4]). Одно из направлений — это разработка новых, более эффективных по сравнению с известными, правил активного управления очередью.

В статье выбран простейший объект исследования — система с одной очередью ограниченной емкости и одним сервером, обслуживающим заявки по одной, без прерывания и в порядке поступления. Для такой системы известно множество AQM-механизмов, самые известные представители которых — алгоритмы типа¹ RED, GRED, REM, NI. Взяв RED за эталон, сформулируем следующий вопрос: есть ли механизм лучше RED с точки зрения вероятности потерь, средней длины очереди и ее дисперсии? Оказывается, что ответ положительный, если отказаться от «структурированности», присущей алгоритмам RED, и ввести рандомизацию. Дополнительный эффект можно получить, учитывая зависимость от оставшегося времени обслуживания заявок.

2 Модель и постановка задачи

Рассматривается обслуживающий прибор (сервер), на который поступает рекуррентный входной поток заявок на выполнение заданий. Независимые промежутки времени между поступлениями заявок характеризуются функцией распределения F . Выполнение заданий происходит на (единственном) месте обслуживания, причем время выполнения каждого задания не зависит от остальных величин и имеет распределение G . В системе имеется также бункер из N мест ожидания. Количество заданий в системе (в бункере плюс в процессе непосредственной обработки) будем называть размером очереди. Всего в системе может находиться максимум $N + 1$ заявка.

Выполнение заданий, присутствующих в системе $\mu = \mu(F, G, N)$ (в обозначениях теории массового обслуживания — это система $G/G/1/N$), осуществляется «без перерыва». Это означает, во-первых, что выполнение задания, раз начавшись, не прерывается. И, во-вторых, если в момент окончания обслуживания какого-либо задания очередь не пуста, то в этот же момент начинается выполнение следующего задания.

В момент поступления заявки принимается решение о том, будет ли задание принято на обслуживание или же заявка будет «сброшена» (потеряна). Если все места ожидания заняты, то заявка сбрасывается автоматически. В ином случае решение зависит от принятого в системе алгоритма обработки поступающих

¹По сути, RED и его разновидности, как, например, GRED, REM, NI, являются частными случаями одного общего механизма сброса, задаваемого функцией сброса (см., например, [6]).

заявок. Этот алгоритм, или стратегия управления очередью (размером очереди), является предметом обсуждения.

Система функционирует в непрерывном времени, $t \geq 0$. Пусть $0 \leq \tau_1 < \tau_2 < \dots$ — моменты поступления заявок в систему, которая изначально была пуста, и пусть y_n — индикатор события $\{\text{задание, поступившее в момент } \tau_n, \text{ принято на обслуживание}\}$.

Стратегией управления очередью в системе μ назовем последовательность случайных величин $y = \{y_n\}$. Задание такой последовательности определяет вероятность P в пространстве траекторий процесса, в частности последовательность условных вероятностей $\sigma = \{\sigma_n\}$, где $\sigma_n = P(Y_n = 1 | \cdot)$ — вероятность «сброса» заявки в зависимости от предыстории. Задание последовательности σ эквивалентно заданию последовательности y в том смысле, что каждая из них порождает один и тот же процесс, однако в конструктивном отношении гораздо удобнее иметь дело с последовательностью σ , поэтому в дальнейшем, говоря о стратегии, будем иметь в виду именно последовательность σ . На выбор компонент σ_n — правил управления — накладывается естественное ограничение, что они должны зависеть только от наблюдаемой предыстории до момента τ_t , в остальном этот выбор может быть произвольным. В свою очередь, наличие ограничений на наблюдаемость не предполагается.

Для того чтобы иметь возможность обсуждать предпочтения среди различных стратегий, необходимо выбрать критерии оценки их качества. В данном случае рассматриваются два показателя, часто используемые в литературе по дисциплинам обслуживания очереди: $q = q(\mu, \sigma)$ — вероятность потерь и $\ell = \ell(\mu, \sigma)$ — средняя длина очереди.

По смыслу проблемы управления размером очереди ясно, что оба показателя требуют минимизации. При этом они являются конкурирующими, поскольку уменьшение q влечет увеличение ℓ и наоборот. В математической теории много-критериальной разрешается различным образом. Распространенным подходом является условная оптимизация, которая используется в следующих разделах.

Пусть μ — сервер с очередью, а Σ — некоторое заданное подмножество допустимых стратегий.

Задача оптимизации 1 (минимум потерь при ограничении на среднюю очередь). Пусть $L > 0$ — заданное число. Найти стратегию $\sigma^{(1)}$ такую, что $q(\mu, \sigma^{(1)}) = \min_{\sigma \in \Sigma} q(\mu, \sigma)$ и $\ell(\mu, \sigma^{(1)}) \leq L$.

Задача оптимизации 2 (минимальная очередь при ограничении на вероятность потерь). Пусть $Q > 0$ — заданное число. Найти стратегию $\sigma^{(2)}$ такую, что $\ell(\mu, \sigma^{(2)}) = \min_{\sigma \in \Sigma} \ell(\mu, \sigma)$ и $q(\mu, \sigma^{(2)}) \leq Q$.

3 Алгоритмы управления очередью

Широкий класс простых алгоритмов управления размером очереди описывается с помощью так называемой функции сброса (dropping function), кото-

рая применительно к рассматриваемой модели представляет собой вектор $p = (p_1, \dots, p_N)$, где p_i — вероятность «сброса» заявки, если в момент ее поступления в системе находится i заданий. Стратегию, порождаемую вектором p , обозначим через $\sigma_{\text{DF}} = \sigma_{\text{DF}}(p)$, а множество всех таких стратегий обозначим через Σ_{DF} .

Как отмечалось во введении, существует много модификаций для функции сброса и большинство из них строятся следующим образом. На отрезке $0 \leq x \leq N$ задается некоторая аппроксимирующая «структурная функция» $\tilde{p}(x)$, $0 \leq \tilde{p}(x) \leq 1$. Эта функция чаще всего выбирается кусочно-линейной, но существуют и нелинейные варианты. Затем подбираются параметры, определяющие конкретный вид функции $\tilde{p}(x)$. Компоненты вектора p определяются как $p_i = \tilde{p}(i)$. Примером может служить однопараметрическая структурная функция ступенчатого вида:

$$\tilde{p}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq x < T; \\ 1, & \text{если } T \leq x \leq N, \end{cases}$$

которая задает алгоритм порогового типа (с порогом T) для сброса заявок.

В качестве еще одного примера рассмотрим структурную функцию $\tilde{p}(x)$, которая порождает алгоритм RED — один из наиболее известных в рассматриваемой области:

$$\tilde{p}_{\text{RED}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq x \leq a; \\ \frac{b(x - a)}{N - a}, & \text{если } a \leq x \leq N, \end{cases}$$

где $0 < a < N$, $0 \leq b \leq 1$. Согласно стратегии $\sigma_{\text{RED}} = \sigma_{\text{RED}}(a, b)$, определенной с помощью этой структурной функции, допуск в систему новой заявки организован следующим образом. Если имеющееся количество заявок в системе меньше чем a , то новая заявка принимается. Если количество заявок в системе, i , находится в диапазоне от a до N , то заявка принимается с вероятностью $1 - \tilde{p}_{\text{RED}}(i)$. Если в системе заняты все места для ожидания, то заявка теряется. Вероятность отказа изменяется, таким образом, кусочно-линейно в диапазоне от 0 до b в зависимости от загруженности системы. Множество всех двухпараметрических стратегий $\sigma_{\text{RED}} = \sigma_{\text{RED}}(a, b)$ обозначим через Σ_{RED} . Аналогичным образом устроены упомянутые во введении алгоритмы GRED, REM и NI.

Наряду с алгоритмами $\sigma_{\text{RED}}(a, b)$ рассмотрим некоторое их обобщение, которое заключается в том, что параметры a и b структурной функции $\tilde{p}_{\text{RED}}(x)$ являются случайными величинами с распределениями соответственно q_a и q_b (q_a — распределение на интервале $0 < a < N$, а q_b — распределение на отрезке $0 \leq b \leq 1$). Управление осуществляется таким образом, что каждый раз, когда с помощью функции $\tilde{p}_{\text{RED}}(x)$ определяется вероятность отказа, в качестве значений параметров a и b выбираются реализации соответствующих случайных величин. Такие стратегии будем обозначать через $\bar{\sigma}_{\text{RED}} = \bar{\sigma}_{\text{RED}}(q)$, $q = (q_a, q_b)$, а всю их совокупность — через $\bar{\Sigma}_{\text{RED}}$.

Ясно, что семейство алгоритмов RED «беднее», чем совокупность рандомизированных алгоритмов RED, а та, в свою очередь, является строгим подмножеством всех стратегий, построенных на основе функции сброса, т. е. $\Sigma_{\text{RED}} \subset \bar{\Sigma}_{\text{RED}} \subset \Sigma_{\text{DF}}$. Возникает вопрос: можно ли улучшить показатели эффективности, выйдя за рамки множества Σ_{RED} ? В следующем разделе на ряде примеров будет дан положительный ответ на этот вопрос. Для этой цели с помощью имитационной модели сравниваются показатели эффективности для стратегий, являющихся приближенными решениями оптимизационных задач 1 и 2 с конкретными объектами μ и различными множествами допустимых стратегий.

Аналогичная схема применена также для выяснения вопроса о том, можно ли повысить эффективность, расширив само множество Σ_{DF} . Рассматриваются «обобщенные функции сброса» вида

$$P = \{p(\tau), \tau > 0\},$$

где $p(\tau) = (p_1(\tau), \dots, p_N(\tau))$, а $p_i(\tau)$ — вероятность сброса заявки при условии, что в момент ее поступления в системе было i заданий, причем выполняемое задание будет занимать место обслуживания еще время τ . Таким образом, предлагается считать вероятность отказа зависящей не только от загруженности системы, но и от оставшегося времени до окончания выполнения задания, находящегося «в работе». Стратегии такого вида обозначаются как $\sigma_{\text{GDF}} = \sigma_{\text{GDF}}(P)$, а совокупность всех таких стратегий обозначается символом Σ_{GDF} .

Следует сделать замечание относительно решения сформулированных в разд. 2 весьма трудных оптимизационных задач. В настоящее время получить на них ответ в аналитическом виде не представляется возможным. Поэтому используется опять-таки имитационная модель и алгоритмы адаптивной градиентной оптимизации, общую теорию которых можно найти в [7, 8]. Детальное изложение этой части исследования не входит в план статьи, поэтому приводятся только приближенные решения оптимизационных задач.

4 Численное сравнение алгоритмов управления размером очереди

В качестве примера рассмотрим систему $\mu = \mu(F, G, N)$, относительно которой в работе [6] приведены результаты некоторых численных экспериментов. В этом примере F (распределение времени между поступлениями заявок) имеет экспоненциальное распределение с параметром λ , G — вырожденное распределение с атомом 1 (время выполнения заданий), $N = 9$.

Сравним следующие четыре типа стратегий в серии из шести экспериментов, в которых параметры системы G и N неизменны, а интенсивность входного потока λ принимает соответственно значения 0,5, 0,75, 1, 1,5, 2 и 3.

Параметры стратегии σ_{RED} взяты из работы [6]. Они имеют одинаковые значения для всех значений λ и равны $a = 3,00008$ и $b = 0,71501$.

Таблица 1 Параметры стратегии $\bar{\sigma}_{\text{RED}}$

λ	q_a		q_b	
0,5	0	0,07	0 1/3 2/3 1	0,51
	1	0,06		0,25
	2	0,08		1,14
	3	0,12		0,10
	4	0,13		
	5	0,13		
	6	0,14		
	7	0,12		
0,75	8	0,15		
	2	0,02	0 1	0,2
	3	0,94		0,8
1,5	4	0,04		
	3	0,32	1 1	
	4	0,60		
	5	0,06		
2	7	0,02		
	0	0,40	1 1	
	1	0,33		
	2	0,21		
3	3	0,05		
	0	0,55	1 1	
	1	0,30		
	2	0,09		
	3	0,04		
	4	0,01		
	5	0,01		

Таблица 2 Вероятности сброса для стратегии σ_{DF}

λ	Количество заданий	Вероятность отказа
0,5	4	0,03
	5	0,35
	6	0,48
	7	1
0,75	4	0,06
	5	0,30
	6	0,49
	7	0,53
	8	1
1	4	0,02
	5	0,07
	6	0,91
	7	0,85
	8	0,65
	9	0,54
1,5	2	0,03
	6	0,53
	7	1
2	2	0,16
	3	0,02
	5	1
	7	0,48
3	2	0,45
	3	0,37
	4	0,08
	5	0,02
	6	
	7	1

Параметры остальных трех стратегий — $\bar{\sigma}_{\text{RED}}$, σ_{DF} и σ_{GDF} — подбираются для каждого значения λ индивидуально путем приближенного решения оптимизационных задач 1 (для $\lambda = 0,5, 0,75$ и 1) или 2 (для $\lambda = 1,5, 2$ и 3). В качестве множества допустимых стратегий в задачах 1 и 2 в зависимости от типа стратегии выбирается $\Sigma = \bar{\Sigma}_{\text{RED}}$, $\Sigma = \Sigma_{\text{DF}}$ или $\Sigma = \Sigma_{\text{GDF}}$. Значения параметров стратегий для разных λ приведены в табл. 1–3.

В табл. 1 указаны значения параметров стратегии $\bar{\sigma}_{\text{RED}}$, которые по определению представляют собой распределения q_a и q_b на интервале $(0, N)$ и на отрезке $[0, 1]$ соответственно. Эти распределения дискретны, и в табл. 1 каждый вариант описан в виде столбцов: столбцов значений коэффициентов a и b и соответствующих столбцов вероятностей.

Таблица 3 Вероятности сброса для стратегии σ_{GDF} в эксперименте 1

λ	Размер очереди								
	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\tau \leq 1/2$									
0,5			0,01	0,27	0,47	1			
0,75			0,03	0,42	0,77	1			
1			0,03	0,98		1			
1,5				1					
2	0,16	0,04	0,28	0,65	0,96	0,86			
3	0,51	0,52	0,54	0,58	0,64	0,72	0,77	1	
$\tau \geq 1/2$									
0,5			0,09	0,41	1				
0,75			0,02	0,60	1				
1			0,01	0,09	0,98	1			
1,5					1				
2	0,13	0,04	0,65	0,81	0,92	1			
3	0,51	0,53	0,55	0,61	0,68	0,75	0,82	1	

В табл. 2 содержатся параметры стратегии σ_{DF} . Эта стратегия определяется вектором p вероятностей отказа в зависимости от количества заданий в системе. Каждому значению λ соответствуют два столбца: в одном указано количество заданий, в другом — вероятность отказа. Приведены только «существенные» значения вектора p (опущены строки с нулевыми вероятностями, а также строки, соответствующие недостижимым при данной стратегии размерам очереди).

В табл. 3 приведены значения параметров стратегии σ_{GDF} . В общем случае стратегия задается набором вероятностей сброса заявки в зависимости от размера очереди и от времени τ до окончания выполнения задания, которое находится на месте обслуживания. В данном случае вероятность отказа определяется размером очереди и событием $\tau \leq 1/2$. Несущественные компоненты стратегии в таблице опущены. Это означает, что вероятность отказа зависит от количества заявок в системе и от выполнения или невыполнения условия $\tau \leq 1/2$.

Результаты имитации работы системы с описанными стратегиями сведены в табл. 4, в которую для дополнительной иллюстрации помещены также значения дисперсии длины очереди.

На рис. 1 и 2 на основе данных из табл. 1 наглядно изображена относительная эффективность изучаемых стратегий. За единицу измерения приняты значения показателей для стратегии σ_{RED} . Высота столбиков означает отношение вероятности потерь (черные столбцы) и средней длины очереди (серые столбцы) для стратегий $\bar{\sigma}_{RED}$, σ_{DF} и σ_{GDF} к аналогичным показателям стратегии σ_{RED} .

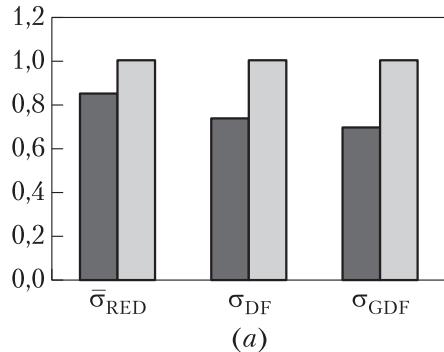
На рис. 1 столбики, относящиеся к показателю «средняя длина очереди», имеют высоту, приблизительно равную 1. Это соответствует тому, что оптимизационная задача 1 решалась при ограничении на среднюю длину очереди,

Таблица 4 Показатели эффективности системы при различных стратегиях

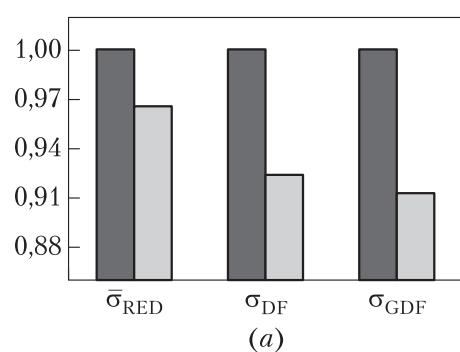
Стратегия	Вероятность потерь, %	Длина очереди	
		средняя	среднеквадратичное отклонение
$\lambda = 0,5$			
σ_{RED}	0,199	0,741	0,924
$\bar{\sigma}_{\text{RED}}$	0,169	0,745	0,936
σ_{DF}	0,147	0,743	0,927
σ_{GDF}	0,139	0,743	0,927
$\lambda = 0,75$			
σ_{RED}	2,002	1,575	1,439
$\bar{\sigma}_{\text{RED}}$	1,963	1,581	1,448
σ_{DF}	1,906	1,580	1,436
σ_{GDF}	1,886	1,576	1,421
$\lambda = 1$			
σ_{RED}	9,128	3,000	1,888
$\bar{\sigma}_{\text{RED}}$	9,052	3,003	1,866
σ_{DF}	8,786	3,003	1,768
σ_{GDF}	8,742	3,006	1,760
$\lambda = 1,5$			
σ_{RED}	33,516	5,751	1,439
$\bar{\sigma}_{\text{RED}}$	33,535	5,552	1,448
σ_{DF}	33,490	5,315	1,436
σ_{GDF}	33,515	5,246	1,421
$\lambda = 2$			
σ_{RED}	50,004	7,146	1,437
$\bar{\sigma}_{\text{RED}}$	50,036	5,551	1,528
σ_{DF}	50,031	4,354	0,773
σ_{GDF}	50,083	4,144	1,047
$\lambda = 3$			
σ_{RED}	66,667	8,390	1,090
$\bar{\sigma}_{\text{RED}}$	66,672	6,940	1,271
σ_{DF}	66,670	6,632	0,560
σ_{GDF}	66,674	6,015	1,685

равному значению этого показателя для стратегии σ_{RED} . (Некоторые отклонения связаны с погрешностью решения оптимизационной задачи.) В то же время отношение показателей «вероятность потерь» заметно меньше единицы для всех стратегий $\bar{\sigma}_{\text{RED}}$, σ_{DF} и σ_{GDF} .

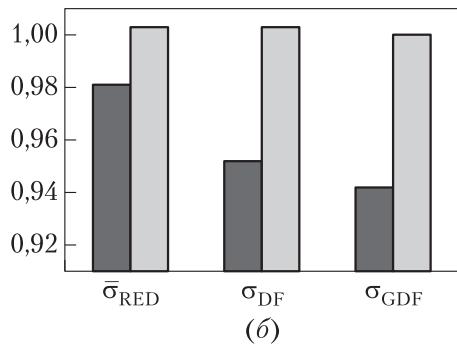
Аналогичная картина имеет место для рис. 2. В этих примерах стратегии определялись в результате решения оптимизационной задачи 2. Ограничения на вероятность потерь полагались равными значению этого показателя для стратегии σ_{RED} , поэтому все четыре стратегии дают примерно равные вероятности



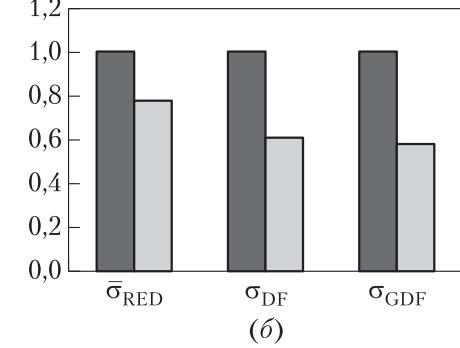
(a)



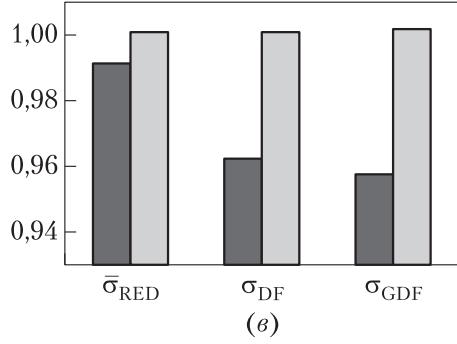
(a)



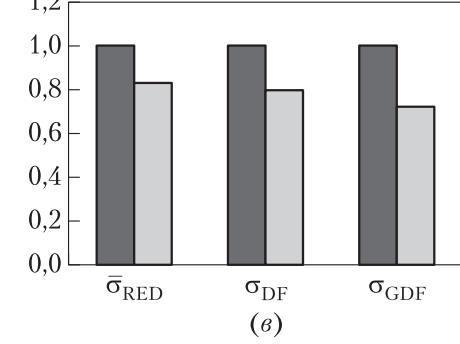
(б)



(б)



(в)



(в)

Рис. 1 Сравнение показателей новых стратегий со стратегией σ_{RED} (оптимизационная задача 1): (a) $\lambda = 0,5$; (б) $0,75$; (в) $\lambda = 1$; черный цвет — вероятность потери; серый цвет — средняя длина очереди

Рис. 2 Сравнение показателей новых стратегий со стратегией σ_{RED} (оптимизационная задача 2): (а) $\lambda = 1,5$; (б) 2 ; (в) $\lambda = 3$; черный цвет — вероятность потери; серый цвет — средняя длина очереди

потерь, но при этом три новые стратегии обеспечивают лучший результат по показателю средней длины очереди. Во всех примерах эффективность четырех рассмотренных стратегий ранжируется по схеме $\sigma_{\text{RED}} \rightarrow \bar{\sigma}_{\text{RED}} \rightarrow \sigma_{\text{DF}} \rightarrow \sigma_{\text{GDF}}$ по основным показателям. Размер выигрыша варьируется в достаточно большом диапазоне и особенно заметен (до 40%) при высокой нагрузке. Для дополнительного показателя — дисперсии длины очереди — отчетлива упорядоченность стратегий не наблюдается, однако, в основном, новые стратегии по крайней мере не проигрывают стратегии σ_{RED} и по этому критерию. Качественные выводы о соотношении показателей изучаемых стратегий сохраняются также по результатам ряда других экспериментов, которые не вошли в краткую заметку.

5 Заключение

Предложена методика повышения эффективности управления размером очереди. Популярные алгоритмы ограничения доступа основаны на использовании функции сброса, задающей вероятность удаления заявки в зависимости от состояния системы. В частности, в широко известной серии алгоритмов типа RED эта функция зависит от текущего размера очереди. Предложения касаются трех направлений: рандомизации параметров алгоритмов типа RED, отказа от структурирования функции сброса и учета дополнительной информации, основанной на наблюдении за временем выполнения заданий. В статье сформулированы три новые конструкции алгоритмов, в которых последовательно реализованы одно, два и все три указанных изменения. Результаты численных экспериментов показали, что эффективность стратегии управления размером очереди, определяемая в терминах вероятности потерь и средней длины очереди, увеличивается по мере перехода к более сложной стратегии. За рамками обсуждения осталась техника нахождения оптимальных значений параметров предложенных алгоритмов. Также осталась незатронутой задача перехода от стратегий с заранее заданными параметрами к алгоритмам, в которых настройка параметров осуществляется непосредственно в процессе функционирования системы. Эти важные вопросы в значительной мере остаются открытыми для дальнейших исследований.

Литература

1. Bonald T., May M., Bolot J. C. Analytic evaluation of red performance // IEEE INFOCOM 2000 Conference on Computer Communications Proceedings, 2000. Vol. 3. P. 1415–1424.
2. Adams R. Active queue management: A survey // IEEE Commun. Surv. Tut., 2013. Vol. 15. Iss. 3. P. 1425–1476.
3. Zhernovyi Yu., Kopytko B., Zhernovyi K. On characteristics of the $M^\theta/G/1/m$ and $M^\theta/G/1$ queues with queue-size based packet dropping // J. Appl. Math. Comput. Mech., 2014. Vol. 13. Iss. 4. P. 163–175.

4. Chydzinski A., Mrozowski P. Queues with dropping functions and general arrival processes // PLoS ONE, 2016. Vol. 11. Iss. 3. Paper e0150702.
5. IETF recommendations regarding active queue management / Eds. F. Baker, G. Fairhurst. — Network Working Group, 2015. <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-aqm-recommendation-07>.
6. Chydzinski A., Chrost L. Analysis of AQM queues with queue size based packet dropping // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2011. Vol. 21. Iss. 3. P. 567–577.
7. Cao Xi-Ren. Stochastic learning and optimization: A sensitivity-based approach. — Springer Science & Business Media, 2007. 586 p.
8. Коновалов М. Г. Методы адаптивной обработки информации и их приложения. — М.: ИПИ РАН, 2007. 212 с.

Поступила в редакцию 15.09.17

CONTROLLING QUEUE SIZE IN A SINGLE SERVER SYSTEM

M. G. Konovalov¹ and R. V. Razumchik^{1,2}

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

²Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation

Abstract: The authors revisit the well-known problem of active queue management in queueing systems and show numerically that the efficiency of the algorithms based on dropping functions can be improved. Three different approaches are discussed: randomization of the parameters of RED-type dropping functions, use of the arbitrary dropping functions either without or with parallel tracking of the remaining/elapsed service time. The relative efficiency of these three approaches is demonstrated on $M/D/1/N$ queue with implemented RED scheme. For various initial settings, simulation results are given, which show that the new active queue management algorithms outperform RED schemes and the gain increases with the increase of the system load.

Keywords: active queue management; random early detection; drop function

DOI: 10.14357/08696527170401

Acknowledgments

The work was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-07-03406).

References

1. Ronald, T., M. May, and J. Bolot. 2000. C. Analytic evaluation of red performance. *IEEE INFOCOM 2000 Conference on Computer Communications Proceedings*. 3:1415–1424.
2. Adams, R. 2013. Active queue management: A survey. *IEEE Commun. Surv. Tut.* 15(3):1425–1476.
3. Zhernovyi, Yu., B. Kopytko, and K. Zhernovyi. 2014. On characteristics of the $M^\theta/G/1/m$ and $M^\theta/G/1$ queues with queue-size based packet dropping. *J. Appl. Math. Comput.* 13(4):163–175.
4. Chydzinski, A., and P. Mrozowski. 2016. Queues with dropping functions and general arrival processes. *PLoS ONE* 11(3). Paper e0150702.
5. Baker, F., and G. Fairhurst, eds. 2015. *IETF recommendations regarding active queue management*. Network Working Group. Available at: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-aqm-recommendation-07> (accessed November 7, 2017).
6. Chydzinski, A., and L. Chrost. 2011. Analysis of AQM queues with queue size based packet dropping. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 21(3):567–577.
7. Cao, Xi-Ren. 2007. *Stochastic learning and optimization: A sensitivity-based approach*. Springer Science & Business Media. 586 p.
8. Konovalov, M. G. 2007. *Metody adaptivnoy obrabotki informatsii i ikh prilozheniya* [Methods of adaptive information processing and their applications]. Moscow: IPI RAN. 212 p.

Received September 15, 2017

Contributors

Konovalov Mikhail G. (b. 1950) — Doctor of Science in technology, 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; mkovalov@ipiran.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

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

И. Н. Синицын¹

Аннотация: Разработано методическое и алгоритмическое обеспечение аналитического моделирования нормальных (гауссовских) процессов в дифференциальных стохастических системах (СтС) с вероятностными интегральными нелинейностями (ВИН) на основе распределений Пирсона (РП) и устойчивых вероятностных распределений (УВР) на базе методов нормальной аппроксимации (МНА) и статистической линеаризации (МСЛ). Получены аналитические выражения для коэффициентов МНА (МСЛ) при степенной аппроксимации типовых РП и УВР — ВИН. Алгоритмы положены в основу модуля разрабатываемого инструментального программного обеспечения StS-Analysis.2017. Тестовые примеры подтверждают достаточную точность разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: вероятностная интегральная нелинейность (ВИН); гамма-распределение; интегральная нелинейность (ИН); метод аналитического моделирования (МАМ); метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); распределение Пирсона (РП); степенное разложение; стохастическая система (СтС)

DOI: 10.14357/08696527170402

1 Введение

В [1] рассмотрены типовые 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. В [2] представлено методическое и алгоритмическое обеспечение аналитического моделирования нормальных стохастических процессов (НСтП) в СтС с ВИН. Рассмотрены типовые ВИН, алгоритмы МСЛ и МНА, а также тестовые примеры. В приложениях приведены аналитические выражения МСЛ для следующих ВИН: экспоненциального, гамма- и χ^2 -распределений, а также необходимые сведения о функциях параболического цилиндра, лежащих в основе алгоритмов, основанных на степенных разложениях.

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

Поставим задачу разработки методического и алгоритмического обеспечения аналитического моделирования нормальных (гауссовых) процессов в дифференциальных СтС с ВИН на основе РП, УВР и на базе МНА (МСЛ).

2 Вероятностные интегральные нелинейности на основе распределений Пирсона

Как известно [3, 4], плотность семейства РП $p(y)$ удовлетворяет следующему обыкновенному дифференциальному уравнению первого порядка:

$$\frac{dp(y)}{dy} = \frac{y - a}{b_0 + b_1 y + b_2 y^2} p(y), \quad (1)$$

где a, b_0, b_1 и b_2 — действительные числа.

Плотности, удовлетворяющие (1), совпадают с предельными формами гипергеометрического распределения. В [3, 4] показано, что в соответствии с распределением корней квадратного уравнения знаменателя в (1) различают 12 типов РП. Обозначим дискриминант знаменателя через $D = b_0 b_1 - b_1^2$, а через λ — отношение $\lambda = b_1^2/b_2$. Тогда имеем следующие выражения для РП:

Тип I ($D < 0, \lambda < 0, b_0 + b_1 y + b_2 y^2 = (\alpha + y)(-\beta + y)b_2$)

$$p(y) = k \left(1 + \frac{y}{a_1}\right)^{m_1} \left(1 - \frac{y}{a_2}\right)^{m_2} \quad (m_1, m_2 > -1, -a_1 \leq y \leq a_2);$$

$$p(y) = \frac{\alpha^{2m} \beta^{2n}}{(\alpha + \beta)^{m+n+1} B(m+1, n+1)} (\alpha + y)^m (\beta - y)^n,$$

$$B(m+1, n+1) = \frac{\Gamma(m+1)\Gamma(n+1)}{\Gamma(m+n+2)} \quad (m > -1, n > -1),$$

где $B(\cdot, \cdot)$ и $\Gamma(\cdot)$ — бета- и гамма-функции (частный случай — бета-распределение 1-го рода).

Тип II ($D < 0, \lambda < 0, a_1 = a_2 = a, m_1 = m_2 = m/2$)

$$p(y) = \left(1 - \frac{y^2}{a^2}\right)^m \quad (-a \leq y \leq a, m \geq -1)$$

(вариант РП типа I).

Тип III ($D < 0, \lambda = \infty, b_0 + b_1 y + b_2 y^2 = (\alpha + y)b_1$)

$$p(y) = k \left(1 + \frac{y}{a}\right)^{\mu a} e^{-\mu y} \quad (-a \leq y \leq \infty, \mu > 0, a > 0);$$

$$p(y) = \frac{k^{m+1}}{\Gamma(m+1)} (y+\alpha)^m e^{-k(\alpha+y)} 1(y+\alpha)$$

(частные случаи — гамма-распределение и χ^2 -распределение).

Тип IV ($D > 0$, $0 < \lambda < 1$, $b_0 + b_1 y + b_2 y^2 = (\alpha^2 + y^2)b_2$)

$$p(y) = k \left(1 + \frac{y^2}{\alpha^2}\right)^{-m} e^{-\mu \operatorname{arctg}(y/\alpha)} \quad (-\infty \leq y \leq \infty, \quad \alpha > 0, \quad \mu > 0);$$

$$p(y) = c (\alpha^2 + y^2)^{-m} \exp \left[-\nu \operatorname{arctg} \left(\frac{y}{\alpha} \right) \right] \quad (m \geq 1),$$

где

$$c^{-1} = \int_{-\infty}^{\infty} (\alpha^2 + y^2)^{-m} \exp \left[-\nu \operatorname{arctg} \left(\frac{y}{\alpha} \right) \right] dy.$$

Тип V ($D = 0$, $\lambda = 1$, $b_0 + b_1 y + b_2 y^2 = (\alpha + y)^2 b_2$)

$$p(y) = k y^{-m} e^{-\gamma/y} \quad (0 \leq y < \infty, \quad \gamma > 0, \quad m > 1);$$

$$p(y) = \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m-1)} y^{-m} e^{-\gamma/y} 1(y)$$

(сводится к типу III).

Тип VI

$$p(y) = k y^{-q_1} (y-a)^{q_2} \quad (a \leq y < \infty, \quad q_1 > q_2 - 1)$$

(сводится к типу I). Частные случаи — бета-распределение 2-го рода и Фишера F -распределение.

Тип VII ($D < 0$, $\lambda = 0$, $b_0 + b_1 y + b_2 y^2 = (\alpha^2 + y^2)b_2$)

$$p(y) = k \left(1 + \frac{y^2}{\alpha^2}\right)^{-m} \quad \left(-\infty < y < \infty, \quad m > \frac{1}{2}\right);$$

$$p(y) = \frac{\alpha}{B(m-1/2, 1/2)} (\alpha^2 + y^2)^{-m} \quad \left(m \geq \frac{1}{2}\right)$$

(частный случай — Стьюдента распределение).

Тип VIII ($D < 0$, $\lambda < 0$, $b_0 + b_1 y + b_2 y^2 = y(\alpha + y)b_2$)

$$p(y) = k \left(1 + \frac{y}{\alpha}\right)^{-m} \quad (-\alpha \leq y \leq 0, \quad 0 \leq m \leq 1).$$

Тип IX ($D < 0, \lambda < 0, b_0 + b_1y + b_2y^2 = y(\alpha + y)b_2$)

$$p(y) = k \left(1 + \frac{y}{\alpha}\right)^m \quad (-\alpha \leq y \leq 0, \quad m > -1).$$

Тип X ($D = 0, \lambda = 0, b_0 + b_1y + b_2^2 = b_0$)

$$p(y) = ke^{-(y-m)/\sigma} \quad (m \leq y < \infty, \quad \sigma > 0)$$

(частный случай — показательное (экспоненциальное) распределение).

Тип XI ($D = 0, \lambda$ — не определено, $b_0 + b_1y + b_2y^2 = b_0$)

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-y^2/(2\sigma^2)},$$

т. е. симметричное нормальное (гауссовское) распределение.

Тип XII

$$p(y) = \left(\frac{1+y/a_1}{1-y/a_2}\right)^m \quad (-a_1 \leq y \leq a_2, \quad |m| > 1)$$

(вариант РП типа I).

Наиболее важны для приложений РП: I, III, VI и VII типы. В [1, 2] были рассмотрены ВИН на основе нормального, экспоненциального, гамма- и χ^2 -распределения. В приложениях П1–П3 приведены краткие сведения о бета- и F -распределениях.

Рассмотрим скалярную нестационарную ВИН следующего вида:

$$Z_t(Y_t, t) = \int_{-\infty}^{Y_t} \psi^{\text{ВИН}}(Y_t, t, \eta) d\eta, \quad (2)$$

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 по определению непрерывна, дифференцируема и удовлетворяет известным условиям [3, 4]. В случаях степенного представления ВИН (2) может быть аппроксимирована следующим выражением [1, 2]:

$$Z_t = \varphi^{\text{ct}}(Y_t, t) + R_n^{\text{ct}}. \quad (3)$$

Здесь

$$\varphi^{\text{ct}}(Y_t, t) = \varphi^+(Y_t, t) \varphi_n^-(Y_t, t),$$

где

$$\varphi_n^-(Y_t, t) = \sum_{k=0}^{n_{\text{ct}}} a_k^-(t) Y_t^k;$$

$\varphi^+(Y_t, t)$ — известная функция; R_n — остаточный член. Применим МСЛ [5–7] к аппроксимированному выражению ВИН:

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

Здесь функция (4) определяется (3). При этом будем считать стохастический процесс (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

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

$$\begin{aligned} k_1 = k_1(m_y, D_y, t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} (\eta - m_y) \varphi(\eta, t) \exp \left[-\frac{(\eta - m_y)^2}{2D_y} \right] d\eta = \\ &= \frac{\partial \varphi_0(m_y, D_y, t)}{\partial D_y}. \end{aligned} \quad (7)$$

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 алгоритмы расчета коэффициентов МСЛ для ВИН на основе бета- и F -распределений. При этом использована степенная аппроксимация ВИН согласно (3).

В общем случае РП, учитывая известные свойства предельных форм гипергеометрического распределения, в силу уравнения (1) интегральная функция

$$p(Y) = \int_0^Y p(\eta) d\eta \quad (8)$$

при известных условиях [5–7] может быть представлена степенным разложением вида:

$$P(Y) = \sum_j \Omega_j Y^j. \quad (9)$$

Принимая во внимание табличный интеграл [8, 9]

$$\begin{aligned} A_n &= \int_{-\infty}^{\infty} x^n \exp(-p_1 x^2 + 2q_1 x) dx = \\ &= n! \exp\left(\frac{q_1^2}{p_1}\right) \sqrt{\frac{\pi}{p_1}} \left(\frac{q_1}{p_1}\right)^n \sum_{l=0}^{E[n/2]} \frac{1}{(n-2l)!l!} \left(\frac{p_1}{4q_1^2}\right)^l \end{aligned} \quad (10)$$

и соотношения

$$p_1 = \frac{1}{2D_y}; \quad q_1 = \frac{m_y}{2D_y}; \quad \frac{q_1^2}{p_1} = \frac{m_y^2}{2D_y}; \quad \frac{p_1}{4q_1^2} = \frac{2D_y}{m_y^2}; \quad \frac{q_1}{p_1} = m_y,$$

перепишем (10) в виде:

$$A_n = n! \exp\left(\frac{m_y^2}{2D_y}\right) \sqrt{2\pi D_y} (m_y)^n \sum_{l=0}^{E[n/2]} \frac{1}{(n-2l)!l!} \left(\frac{2D_y}{m_y^2}\right)^l. \quad (11)$$

Здесь $E[\cdot]$ — символ целой части. Поэтому коэффициенты МСЛ для РП — ВИН примут следующий вид:

$$\varphi_0^{\text{пп}}(m_y, D_y) = \sum_{j=0}^{\infty} (j+1) \Omega_j (m_y)^{j+1} \sum_{l=0}^{E[(j+1)/2]} \frac{1}{(j+1-2l)!l!} \left(\frac{2D_y}{m_y^2}\right)^l; \quad (12)$$

$$k_1^{\text{пп}}(m_y, D_y) = \frac{\partial \varphi_0^{\text{пп}}}{\partial m_y}(m_y, D_y). \quad (13)$$

Отсюда, ограничиваясь в (12) и (13) конечным числом членов $n = n_{\text{пп}}$, получим уравнения для соответствующих алгоритмов для $\varphi_{0,n}^{\text{пп}}$ и $k_{1,n}^{\text{пп}}$. При этом точность

таких алгоритмов оценивается стандартным методом путем расчета остаточного члена [10].

Таким образом, имеет место следующее утверждение.

Теорема 2.1. Пусть нецентрированный СтП $Y_t = Y(t)$ ($m_y \neq 0$) обладает конечной дисперсией D_y . Тогда степенное разложение (9) ВИН на основе РП допускает статистическую линеаризацию согласно (5)–(7) и (12), (13).

3 Вероятностные интегральные нелинейности на основе устойчивых вероятностных распределений

Как известно [4], для УВР функция распределения и плотность скалярной с.в. Y определяются следующими формулами:

$$F(a_1y + b_1) * F(a_2y + b_2) = F(ay + b);$$

$$p(y; \alpha, \beta, \gamma, c) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda y} \exp \left\{ i\gamma\lambda - c|\lambda|^{\alpha} \left[1 + i\beta \frac{\lambda}{|\lambda|} \omega(\lambda, \alpha) \right] \right\} d\lambda,$$

где

$$\omega(\lambda, \alpha) = \begin{cases} \operatorname{tg} \frac{\pi\alpha}{2} & \text{при } \alpha \neq 1; \\ \frac{2}{\pi} \ln |\lambda| & \text{при } \alpha = 1. \end{cases}$$

При $\alpha > 0$ все УВР непрерывны и их плотности в каждой точке имеют производные всех порядков. Для $\alpha = 2$ УВР является нормальным распределением, а при $\alpha = 1$ — распределением Коши. При $\alpha = 1/2$ имеем распределение:

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi y^3}} e^{-(1/2)y} 1(y).$$

При $\alpha = 0$ УВР является вырожденным, а при $0 < \alpha < 2$ УВР являются безгранично делимыми распределениями.

Выделим среди УВР следующий важный класс распределений, когда $\alpha > 0$, $\gamma = 0$, $c = 1$, т. е. вида $p(y; \alpha, \beta) = p(y; \alpha, \beta, 0, 1)$. В этом случае имеет место соотношение:

$$p(y; \alpha, \beta) = p(-y; \alpha, -\beta).$$

Отсюда, в частности, находим при $0 < \alpha < 1$

$$p(y; \alpha, \beta) = \frac{1}{\pi y} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \sin \left[\frac{k\pi}{2} \alpha(\beta + 1) \right] \frac{\Gamma(k\alpha + 1)}{k!} y^{-k\alpha} 1(y).$$

При $1 < \alpha < 2$ имеем:

$$\begin{aligned} p(y; \alpha, \beta) &= \\ &= \frac{1}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\Gamma(k+1)/\alpha}{\alpha k!} \cos \left\{ \frac{k\pi}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{1}{k} \right) \frac{2-\alpha}{\alpha} \beta \right] \right\} y^k 1(y). \quad (14) \end{aligned}$$

В общем случае для ВИН на основе УВР степенное разложение (8) имеет вид:

$$P(Y) = \int_0^Y p(\eta; \alpha, \beta, \gamma, c) d\eta = \sum_{j=0}^{\infty} \Omega_j^P(\alpha, \beta, \gamma, c) Y^{j+1}. \quad (15)$$

Здесь введены обозначения:

$$\Omega_j^P = \Omega_j^P(\alpha, \beta, \gamma, c) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(-i\lambda)^j}{(j+1)!} \Omega(\lambda, \alpha, \beta, \gamma, c) d\lambda, \quad (16)$$

где

$$\Omega(\lambda, \alpha, \beta, \gamma, c) = \exp \left\{ i\gamma\lambda - c|\lambda|^{\alpha} \left[1 + i\beta \frac{\lambda}{|\lambda|} \omega(\lambda, \alpha) \right] \right\}. \quad (17)$$

Коэффициенты МСЛ для РП — ВИН на основе (15)–(17) примут следующий вид:

$$\varphi_0^{\text{УВР}}(m_y, D_y) = \sum_{j=0}^{\infty} (j+1)! \Omega_j^P(m_y)^{j+1} \sum_{l=0}^{E[(j+1)/2]} \frac{1}{(j+1-2l)!l!} \left(\frac{2D_y}{m_y^2} \right)^l; \quad (18)$$

$$k_1^{\text{УВР}}(m_y, D_y) = \frac{\partial \varphi_0^{\text{УВР}}}{\partial m_y}(m_y, D_y). \quad (19)$$

Ограничиваясь в (18) и (19) конечным числом членов $n^{\text{УВР}}$, получим соответствующие алгоритмы МСЛ для РП — ВИН. Точность оценивается стандартным методом [10].

Таким образом, справедливо следующее утверждение.

Теорема 3.1. Пусть нецентрированный СтП $Y_t = Y(t)$ ($m_y \neq 0$) обладает конечной дисперсией D_y . Тогда ВИН на основе УВР определяются степенным разложением (15) и допускают статистическую линеаризацию согласно (5)–(7) и (18), (19).

4 Алгоритмы аналитического моделирования нормальных процессов в стохастических системах с вероятностными интегральными нелинейностями [2]

Уравнения функционирования конечномерных непрерывных нелинейных систем со стохастическими возмущениями путем расширения вектора состояния СтС с ВИН могут быть записаны в виде следующего векторного стохастического дифференциального уравнения Ито [1, 2]:

$$dY_t = a^{\text{вин}}(Y_t, t) dt + b^{\text{вин}}(Y_t, t) dW_0 + \int_{R_0} c^{\text{вин}}(Y_t, t, v) P^0(dt, dv), \\ Y(t_0) = Y_0. \quad (20)$$

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 .

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

— для характеристических функций

$$\left. \begin{aligned} g_1^N(\lambda; t) &= \exp \left[i\lambda^T m_t - \frac{1}{2} \lambda^T K_t \lambda \right]; \\ g_{t_1, t_2}^N(\lambda_1, \lambda_2; t_1, t_2) &= \exp \left[i\bar{\lambda}^T \bar{m}_2 - \frac{1}{2} \bar{\lambda}^T \bar{K}_2 \bar{\lambda} \right], \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

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 $K(t_1, t_2)$

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t &= a_1^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t), & m_0 &= m(t_0); \\ \dot{K}_t &= a_2^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t), & K_0 &= K(t_0); \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K(t_1, t_2) a_{21}^{\text{ВИН}}(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T, & K(t_1, t_1) &= K_{t_1}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} m_t &= M_{\Delta_y}^N[Y_t]; \quad Y_t^0 = Y_t - m_t; \\ K_t &= M_{\Delta_y}^N[Y_t^0 Y_t^{0T}]; \quad K(t_1, t_2) = M_{\Delta_y}^N[Y_{t_1}^0 Y_{t_2}^{0T}]; \\ a_1^{\text{ВИН}} &= a_1^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N[a^{\text{ВИН}}(Y_t, t)]; \\ a_2^{\text{ВИН}} &= a_2^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = a_{21}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) + a_{21}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t)^T + a_{22}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t); \\ a_{21}^{\text{ВИН}} &= a_{21}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N[a^{\text{ВИН}}(Y_t, t) Y_t^{0T}]; \\ a_{22}^{\text{ВИН}} &= a_{22}^{\text{ВИН}}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N[\bar{\sigma}^{\text{ВИН}}(Y_t, t)]; \\ \sigma^{\text{ВИН}}(Y_t, t) &= b^{\text{ВИН}}(Y_t, t) \nu_0(t) b^{\text{ВИН}}(Y_t, t)^T; \\ \bar{\sigma}(Y_t, t) &= \sigma^{\text{ВИН}}(Y_t, t) + \int_{R_0^q} c^{\text{ВИН}}(Y_t, t, v) c^{\text{ВИН}}(Y_t, t, v)^T \nu_P(t, dv), \end{aligned} \quad (23)$$

где $M_{\Delta_y}^N$ — символ вычисления математического ожидания для нормальных распределений (21) на гладком многообразии Δ_y .

Для стационарных СтС стационарные НСтП — если они существуют, то $m_t = m^*$, $K_t = K^*$, $K(t_1, t_2) = k(\tau)$ ($\tau = t_1 - t_2$), — определяются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} a_1^{\text{ВИН}}(m^*, K^*) &= 0; \quad a_2^{\text{ВИН}}(m^*, K^*) = 0; \\ \dot{k}_\tau(\tau) &= a_{21}^{\text{ВИН}}(m^*, K^*) K^{*-1} k(\tau), \quad k(0) = K^* \quad (\forall \tau > 0); \\ k(\tau) &= k(-\tau)^T \quad (\forall \tau < 0). \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

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

В случае аддитивных гауссовских (нормальных) и обобщенных пуассоновских возмущений уравнение (20) принимает вид:

$$\dot{Y} = a^{\text{вих}}(Y_t, t) + b_0(t)V, \quad V = \dot{W}, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (25)$$

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

В случае СтС (25) уравнения МНА переходят в известные уравнения МСЛ:

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t &= a_1^{\text{вих}}(m_t, K_t, t), \quad m_0 = m(t_0); \\ \dot{K}_t &= k_1^{\text{виха}}(m_t, K_t, t)K_t + K_t k_1^{\text{виха}}(m_t, K_t, t)^T + \sigma_0(t), \quad K_0 = K(t_0); \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K(t_1, t_2)K_{t_2}k_1^{\text{виха}}(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T, \quad K(t_1, t_2) = K_{t_1}, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где

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

При условии асимптотической устойчивости матрицы $k_1^a(m^*, K^*)$ для стационарных СтС (25) в основе МСЛ лежат уравнения (24), записанные в виде:

$$\left. \begin{aligned} a_0^{\text{вих}}(m^*, K^*) &= 0; \\ k_1^{\text{виха}}(m^*, K^*)K^* + K^*k_1^{\text{виха}}(m^*, K^*)^T + \bar{\sigma}_0^{\text{вих*}} &= 0; \\ \dot{k}_\tau(\tau) &= k_1^{\text{виха}}(m^*, K^*)k(\tau), \quad k(0) = K^* \quad (\forall \tau > 0), \\ k(\tau) &= k(-\tau)^T \quad (\forall \tau < 0). \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

В случае аддитивного шума в (20), когда $b^{\text{вих}}$ и $c^{\text{вих}}$ не зависят от Y_t , уравнения МНА переходят в уравнения МСЛ.

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

Теорема 4.1. *Если существуют интегралы (23), то уравнения (21) и (22) лежат в основе нестационарных алгоритмов МАМ для негауссовских СтС (20), а уравнения (26) — для негауссовских СтС (25).*

Теорема 4.2. *Если СтС (20) и (25) стационарны и существует стационарный НСтП, а матрица a_{21}^* асимптотически устойчива, то уравнения (24) и (27) лежат в основе стационарных алгоритмов МАМ.*

Для алгоритмизации МНА необходимо уметь вычислять следующие интегралы:

$$\begin{aligned} I_0^{\text{вина}} &= I_0^{\text{вина}}(m_t, K_t, t) = a_1^{\text{вин}}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N[a^{\text{вин}}(Y_t, t)] ; \\ I_1^{\text{вина}} &= I_1^{\text{вина}}(m_t, K_t, t) = a_{21}^{\text{вин}}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N \left[a^{\text{вин}}(Y_t, t) Y_t^{0T} \right] ; \\ I_0^{\text{вин}\bar{\sigma}} &= I_0^{\text{вин}\bar{\sigma}}(m_t, K_t, t) = a_{22}^{\text{вин}}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N [\bar{\sigma}^{\text{вин}}(Y_t, t)] , \end{aligned} \quad (28)$$

а для МСЛ достаточно вычислить первый интеграл в (28), причем интеграл $I_1^{\text{вина}}$ вычисляется по формуле:

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

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. Алгоритмы дискретного аналитического и статистического моделирования для СтС с ВИН, а также смешанные алгоритмы различной степени точности относительно шага интегрирования также представлены в [11].

5 Тестовые примеры

5.1. Рассмотрим алгоритмы МАМ для одномерной СтС с аддитивным шумом и РП — ВИН, описываемой следующим уравнением:

$$\dot{Y}_t = a_t \int_0^{Y_t} \psi^{\text{РП}}(\eta_t) d\eta_t + b_t V_t , \quad (29)$$

где a_t и b_t — известные скалярные функции; V_t — скалярный гауссовский (нормальный) белый шум интенсивности ν_t . Уравнения МАМ стохастический динамики (29), если провести степенную аппроксимацию РП — ВИН, примут следующий вид:

$$\dot{m}_t = a_t \varphi_0(m_t, D_t) , \quad m_{t_0} = m_0 ; \quad (30)$$

$$\dot{D}_t = 2a_t k_1^\varphi(m_t, D_t) D_t + b_t \nu_t , \quad D_{t_0} = D_0 . \quad (31)$$

Входящие сюда коэффициенты МСЛ $\varphi_0(m_t, D_t)$ и $k_1^\varphi(m_t, D_t)$ определены в разд. 2. В стационарном случае, когда $a_t = a^*$, $b_t = b^*$ и $\nu_t = \nu^*$ не зависят от времени, причем $a^* < 0$, стационарные значения m^* и D^* находятся из уравнений (30) и (31) при $\dot{m}^* = 0$ и $\dot{D}^* = 0$:

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

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

5.2. Для одномерной СтС с параметрическим РП — ВИН при белом шуме, когда

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

уравнения МАМ на основе МНА примут следующий вид:

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

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

В стационарном случае, когда $a_{1t} = a_1^* < 0$, m^* и 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%.

5.3. Следуя [1], рассмотрим интегральный РП-осциллятор (РПО) в стохастической среде:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_1 &= Y_2, \quad \dot{Y}_2 = -\omega_0^2 \int_0^{Y_1} \psi^{\text{пп}}(Y_1) dY_1 + L_0 - 2\varepsilon\omega_0 Y_2 + h^2 V, \\ Y_1(t_0) &= Y_{10}, \quad Y_2(t_0) = Y_{20}. \end{aligned}$$

Здесь Y_1 и Y_2 — координата и скорость; $\psi^{\text{пп}}(Y_1)$ — интегральная функция, определяющая интегральный РПО; L_0 — постоянная или медленно меняющаяся на интервале времени $T = 2\pi\omega_0^{-1}$ величина; $-2\varepsilon\omega_0 Y_2$ — линейная диссипативная составляющая; $h^2 V$ — стохастическая составляющая, представляющая собой нормальный белый шум интенсивности $h^2\nu$; ε , h и ω_0^2 — постоянные параметры; Y_{10} и Y_{20} — нормальные независимые начальные координата и скорость.

Применяя уравнения разд. 4 для $D_1 = K_{11}$, $D_2 = K_{22}$, K_{12} и различных РП — ВИН, получим искомые уравнения аналитического моделирования нормальных процессов в РПО:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{m}_1 = 0, \\ \dot{m}_2 = -\omega_0^2 \varphi_0^{\text{pp}}(m_1, D_1) + L_0 - 2\varepsilon\omega_0 m_2, \\ \dot{D}_1 = 2K_{12}, \\ \dot{D}_2 = -2[\omega_0^2 \varphi_0^{\text{pp}}(m_1, D_1) K_{12} + 2\varepsilon\omega_0 D_2] + h^2\nu, \\ \dot{K}_{12} = D_2 - \omega_0^2 k_1^\varphi(m_1, D_1) D_1 - 2\varepsilon\omega_0 K_{12}, \end{array} \right. \begin{array}{l} m_1(t_0) = m_{10}; \\ m_2(t_0) = m_{20}; \\ D_1(t_0) = D_{10}; \\ D_2(t_0) = D_{20}; \\ K_{12}(t_0) = K_{120}. \end{array} \quad (32)$$

При $\varepsilon > 0$ для стационарного случая уравнения (32) принимают вид:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_1^*; & m_2 &= m_2^* = 0; & -\omega_0^2 \varphi_0^{\text{pp}}(m_1^*, D_1^*) + L_0 &= 0; \\ K_{12} &= K_{12}^* = 0; & D_2^* &= \frac{h^2\nu}{4\varepsilon\omega_0}; & \omega_0^2 D_1^* k_1^{\text{pp}}(m_1^*, D_1^*) &= D_2^*. \end{aligned}$$

Отсюда находим стационарные значения

$$m_1^* = 0; \quad m_2^* = 0; \quad K_{12}^* = 0; \quad D_2^* = \frac{h^2\nu}{4\varepsilon\omega_0},$$

при этом дисперсия координаты D_1^* определяется из уравнения:

$$D_1^* k_1^{\text{pp}}(0, D_1^*) = \gamma \quad \left(\gamma = \frac{h^2\nu}{4\varepsilon\omega_0^3} \right).$$

6 Заключение

Разработано методическое и алгоритмическое обеспечение аналитического моделирования нормальных (гауссовских) процессов в дифференциальных СтС с ВИН на основе РП и УВР на базе МНА (МСЛ).

Получены аналитические выражения для коэффициентов МНА (МСЛ) при степенной аппроксимации типовых РП и УВР — ВИН.

Алгоритмы положены в основу модуля разрабатываемого инструментального программного обеспечения StS-Analysis.2017.

Приведены три тестовых примера с оценкой точности. Примеры подтверждают достаточную точность разработанных алгоритмов.

Результаты допускают обобщения как новые классы ВИН (например, системы с инвариантной мерой, одно- и многоканальные угловые, сферические и др.), так и методы аппроксимации ВИН (многочленные, рациональные, дробно-рациональные, ортогональные разложения, асимптотические, а также итерационные).

Приложения

П1. Нелинейность в виде неполной бета-функции [5]

Определения и свойства

$$P(Y) = I_Y(a, b) = \frac{1}{B(a, b)} \int_0^Y \eta^{a-1} (1-\eta)^{b-1} d\eta = \frac{B_Y(a, b)}{B(a, b)}.$$

Здесь $B(a, b)$ и $B_Y(a, b)$ — полная и неполная бета-функции, причем

$$\begin{aligned} B(a, b) &= \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} = B(b, a); \\ I_Y(a, b) &= 1 - I_{1-Y}(b, a). \end{aligned}$$

Если с.в. X_1^2 и X_2^2 имеют $\chi_{\nu_1}^2$ - и $\chi_{\nu_2}^2$ -распределения, то с.в. $X_1^2/(x_1^2 + X_2^2)$ имеет бета-распределение с $2a = \nu_1$ и $2b = \nu_2$ степенями свободы.

Функциональные соотношения

$$\begin{aligned} I_Y(a, b) &= Y I_Y(a-1, b) + (1-Y) I_Y(a, b-1); \\ I_Y(a, b) &= \frac{1}{Y} [I_y(a+1, b) - (1-Y) I_Y(a+1, b)]; \\ I_Y(a, b) &= \frac{1}{a(1-Y)+b} [b I_Y(a, b+1) + a(1-Y) I_Y(a+1, b-1)]; \\ I_Y(a, b) &= \frac{1}{a+b} [a I_Y(a+1, b) + b I_Y(a, b+1)]; \\ I_Y(a, b) &= \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a+1)\Gamma(b)} Y^a (1-Y)^b + I_Y(a+1, b-1) = \\ &= \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a+1)\Gamma(b)} Y^a (1-Y)^b + I_Y(a+1, b). \end{aligned}$$

Разложения в ряды ($0 < Y < 1$)

$$\begin{aligned} I_Y(a, b) &= \frac{Y^a (1-Y)^b}{a B(a, b)} \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B(a+1, n+1)}{B(a+b, n+1)} Y^{n+1} \right]; \\ I_Y(a, b) &= \frac{Y^a (1-Y)^{b-1}}{a B(a, b)} \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B(a+1, n+1)}{B(b-n-1, n+1)} \left(\frac{Y}{1-Y} \right)^{n+1} \right] = \\ &= \frac{Y^a (1-Y)^{b-1}}{a B(a, b)} \left[1 + \sum_{n=0}^{s-2} \frac{B(a+1, n+1)}{B(b-n-1, n+1)} \left(\frac{Y}{1-Y} \right)^{n+1} \right] + I_Y(a+s, b-s). \end{aligned}$$

Степенные разложения и коэффициенты метода статистической линеаризации

Для нахождения коэффициентов МСЛ для ВИН на основе неполной бета-функции разложим $(1 - Y)^b$ в степенной ряд

$$(1 - Y)^b = \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \frac{b(b-1)\cdots(b-j+1)}{j!} Y^j \quad (33)$$

и воспользуемся табличным интегралом [8, 9]

$$\int_0^{\infty} x^{\nu-1} \exp(-\beta x^2 - \gamma x) dx = (2\beta)^{-\nu/2} \Gamma(\nu) \exp\left(\frac{\gamma^2}{8\beta}\right) D_{-\nu}\left(\frac{\gamma}{\sqrt{2\beta}}\right), \quad (34)$$

положив

$$2\beta = \frac{1}{D_y}; \quad \gamma = -\frac{m_y}{D_y}; \quad \frac{\gamma^2}{8\beta} = \frac{m_y^2}{4D_y}; \quad \frac{\gamma}{\sqrt{2\beta}} = -\frac{m_y}{\sqrt{D_y}}. \quad (35)$$

Здесь $D_\mu(\cdot)$ — функция параболического цилиндра [4]. В результате получим следующие представления для коэффициентов МСЛ $\varphi_0(m_y, D_y)$ и $k_1^\varphi(m_y, D_y)$:

$$\begin{aligned} \varphi_0(m_y, D_y) &= \frac{\exp(-m_y^2/(4D_y)) D_y^{a/2}}{\sqrt{2\pi} a B(a, b)} \left[\Gamma(a+1) D_{-(a+1)}\left(-\frac{m_y}{\sqrt{D_y}}\right) + \right. \\ &+ \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j!} b(b-1)\cdots(b-j+1) \Gamma(a+1+j) D_y^{j/2} + D_{-(a+1+j)}\left(-\frac{m_y}{\sqrt{D_y}}\right) + \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(a+2+n) B(a+1, n+1)}{B(a+b, n+1)} D_y^n D_{-(a+2+n)}\left(-\frac{m_y}{\sqrt{D_y}}\right) + \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B(a+1, n+1)}{B(a+b, n+1)} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j!} b(b-1)\cdots \\ &\cdots (b-j+1) \Gamma(j+n+a+2) D_y^{(j+n)/2} D_{-(j+n+a+2)}\left(-\frac{m_y}{\sqrt{D_y}}\right) \left. \right]; \quad (36) \end{aligned}$$

$$k_1^\varphi(m_y, D_y) = \frac{\partial \varphi_0}{\partial m_y}(m_y, D_y). \quad (37)$$

Ограничаваясь в (36) и (37) конечным числом членов, получим приближенные выражения для степенных алгоритмов вычисления коэффициентов МСЛ. Точность оценивается согласно [10] по остаточному члену R_n .

П2. Нелинейность в виде F -распределения Фишера

Определения и свойства

$$P(F|\nu_1, \nu_2) = \frac{\nu_1^{\nu_1/2} \nu_2^{\nu_2/2}}{B(\nu_1/2, \nu_2/2)} \int_0^F \xi^{(\nu_1-2)/2} (\nu_2 + \nu_1 \xi)^{-(\nu_1+\nu_2)/2} d\xi;$$

$$Q(F|\nu_1, \nu_2) = 1 - P(F|\nu_1, \nu_2) = I_X\left(\frac{\nu_2}{2}, \frac{\nu_1}{2}\right).$$

Здесь с.в. F и X , определяемые формулами:

$$F = \frac{X_1^2/\nu_1}{X_2^2/\nu_2}; \quad X = \frac{\nu_2}{\nu_2 + \nu_1 F},$$

где X_1 и X_2 — с.в., имеющие $\chi_{\nu_1}^2$ - и $\chi_{\nu_2}^2$ -распределения; $I_X(\cdot, \cdot)$ — неполная бета-функция (см. приложение П1).

Разложения в ряды ($\nu_1 = 2r_1$, $\nu_2 = 2r_2$)

$$Q(F|\nu_1, \nu_2) = X^{\nu_2/2} \left[1 + \frac{\nu_2}{2} (1-X) + \frac{\nu_2(\nu_2+2)}{2 \cdot 4} + \dots + \frac{\nu_2(\nu_2+2) \cdots (\nu_2+\nu_1-4)}{2 \cdot 4 \cdots (\nu_1-2)} (1-X)^{(\nu_1-2)/2} \right]; \quad (38)$$

$$Q(F|\nu_1, \nu_2) = 1 - (1-X)^{\nu_1/2} \left[1 + \frac{\nu_1 X}{2} + \frac{\nu_1(\nu_1+2)}{2 \cdot 4} X^2 + \dots + \frac{\nu_1(\nu_1+2) \cdots (\nu_2+\nu_1-4)}{2 \cdot 4 \cdots (\nu_2-2)} X^{(\nu_2-2)/2} \right]; \quad (39)$$

$$Q(F|\nu_1, \nu_2) = X^{(\nu_1+\nu_2-2)/2} \left[1 + \frac{\nu_1 + \nu_2 - 2}{2} \frac{1-X}{X} + \frac{(\nu_1 + \nu_2 - 2)(\nu_1 + \nu_2 - 4)}{2 \cdot 4} \left(\frac{1-X}{X}\right)^2 + \dots + \frac{(\nu_1 + \nu_2 - 2) \cdots (\nu_2 + 2)}{2 \cdot 4 \cdots (\nu_1 - 2)} \left(\frac{1-X}{X}\right)^{(\nu_1-2)/2} \right]; \quad (40)$$

$$Q(F|\nu_1, \nu_2) = 1 - (1-X)^{(\nu_1+\nu_2-2)/2} \left[1 + \frac{\nu_1 + \nu_2 - 2}{2} \frac{1-X}{X} + \dots + \frac{(\nu_1 + \nu_2 - 2) \cdots (\nu_1 + 2)}{2 \cdot 4 \cdots (\nu_2 - 2)} \left(\frac{1-X}{X}\right)^{(\nu_1-2)/2} \right]. \quad (41)$$

Разложения в ряды ($\nu_1 = 2r_1 + 1, \nu_2 = 2r_2 + 1$)

$$Q(F|\nu_1, \nu_2) = 1 - A(t|\nu_2) + \beta(\nu_1, \nu_2).$$

Здесь

$$A(t|\nu_2) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left\{ \Theta + \sin \Theta \sum_{j=1}^{(\nu_2-1)/2} \frac{(2j-2)!!}{(2j-1)!!} \cos^{2j-1} \Theta \right\} & \text{при } \nu_2 > 1; \\ \frac{2\Theta}{\pi} & \text{при } \nu_2 = 1; \end{cases}$$

$$\beta(\nu_1, \nu_2) = \begin{cases} \left[\frac{\nu_2-1}{2} \right]! \sin \Theta \cos^{\nu_2} \Theta \times \\ \times \left[1 - \sum_{j=1}^{(\nu_1-3)/2} \frac{(\nu_2+2j-1)!!}{(2j+1)!!} \sin^{2j} \Theta \right] & \text{при } \nu_1 > 1; \\ 0 & \text{при } \nu_1 = 0, \end{cases}$$

где

$$\Theta = \arctg \sqrt{\frac{\nu_1}{\nu_2}} F.$$

Пользуясь формулами (33)–(37), приходим к следующим выражениям для коэффициентов МСЛ для ВИН на базе F -распределения и степенном разложении (38) относительно с.в. X :

$$\varphi_0^Q(m_y, D_t y) + A_{\nu_2/2} + \frac{\nu_2}{2} \left[A_{\nu_2/2} - A_{\nu_2/2+1} + \cdots + \frac{(\nu_2+2) \cdots (\nu_2+\nu_1-4)}{4 \cdots (\nu_1-2)} \times \right. \\ \times \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j!} \left(\frac{\nu_1}{2} - 1 \right) \left(\frac{\nu_1}{2} - 2 \right) \cdots \left(\frac{\nu_1}{2} - j \right) A_{(\nu_2/2)+j} \left. \right]; \\ k_1^Q(m_y, D_y) = \frac{\partial \varphi_0^Q}{\partial m_y}(m_y, D_y); \quad k_1^P(m_y, D_y) = \frac{\partial \varphi_0^P}{\partial m_y}(m_y, D_y); \\ \varphi_0^P(m_y, D_y) = 1 - \varphi^Q(m_y, D_y).$$

Здесь A_n определены формулами (10) и (11).

Аналогично вычисляются коэффициенты МСЛ для степенных разложений (39)–(41).

П3. Нелинейность в виде устойчивых вероятностных распределений (14)

Определения

$$P(Y) = \int_0^Y p(\eta; \alpha, \beta) d\eta = \\ = \frac{1}{\alpha\pi} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\Gamma((k+1)/\alpha)}{(k+1)!} \cos \left\{ \frac{k\pi}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{1}{k} \right) \frac{2-\alpha}{\alpha} \beta \right] Y^{k+1} \right\};$$

$$\begin{aligned} Q(Y) &= 1 - P(Y); \\ \varphi_0^P(m_y, D_y) &= \frac{1}{\alpha\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k+1)!} \Gamma((k+1)/\alpha) \times \\ &\quad \times \cos \left\{ \frac{k\pi}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{1}{k} \right) \frac{2-\alpha}{\alpha} \right] \right\} (m_y)^{k+1} \sum_{l=0}^{E[(k+1)/2]} \frac{1}{(k+1-2l)!l!} \left(\frac{2D_y}{m_y^2} \right)^l; \\ k_1^Q(m_y, D_y) &= \frac{\partial \varphi_0^Q}{\partial m_y}(m_y, D_y); \quad k_1^P(m_y, D_y) = \frac{\partial \varphi_0^P}{\partial m_y}(m_y, D_y); \\ \varphi^Q(m_y, D_y) &= 1 - \varphi^P(m_y, D_y). \end{aligned}$$

Литература

1. 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.
2. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с интегральными нелинейностями (II) // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 3. С. 23–36.
3. Прохоров А. В. Кривые Пирсона // Математическая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1984. Т. 4. С. 288–290.
4. Рогозин Б. А. Устойчивое распределение // Математическая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1984. Т. 5. С. 557–558.
5. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с.
6. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
7. Синицын И. Н., Синицын В. И. Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации распределений в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
8. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и производствий. — М.: ГИФМЛ, 1963. 1100 с.
9. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича, И. Стигана. — М.: Наука, 1979. 832 с.
10. Попов Б. А., Теслер Г. С. Вычисление функций на ЭВМ: Справочник. — Киев: Наукова думка, 1984. 599 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 07.04.17

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

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: Methodological and algorithmical support for analytical modeling of normal (Gaussian) processes in differential stochastic systems with probabilistic integral nonlinearities (IN) based on Pearson distributions (PD) and stable probabilistic distributions (SPD) is presented. Support is based on the methods of statistical linearization (MSL) and normal approximation (MNA). Probabilistic IN were approximated by power expansions. The MSL and MNA coefficients for probabilistic IN based on PD and SPD are given. The MSL coefficients for incomplete beta-function and F -distribution are considered. Some SPD types are described. Test examples with accuracy estimation are given. Results may be generalized as new types of probabilistic IN (multichannel angular, spherical, etc.) and various numerical approximations (polynomial, rational, fractional rational, orthogonal, asymptotic, and iterative).

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

DOI: 10.14357/08696527170402

References

1. Sinitsyn, I. N. 2017. Analiticheskoe modelirovaniye normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh s integral'nymi nelineynostyami (I) [Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with integral nonlinearities (I)]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):3–15.
2. Sinitsyn, I. N. 2017. Analiticheskoe modelirovaniye normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh s integral'nymi nelineynostyami (II) [Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with integral nonlinearities (II)]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(3):23–36.
3. Prokhorov, A. V. 1984. Krivye Pirsona [Pearson curves]. *Matematicheskaya entsiklopediya* [Mathematical encyclopedia]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya. 4:288–290.
4. Rogozin, B. A. 1984. Ustoychivoe raspredelenie [Stable distribution]. *Matematicheskaya entsiklopediya* [Mathematical encyclopedia]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya. 4:557–558.

5. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester, New York, NY: Jonh Wiley. 549 p.
6. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
7. 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.
8. 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.
9. Abramovich, M., and I. Stigan, eds. *Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam* [Computing of functions: Handbook]. Moscow: Nauka. 1979. 832 p.
10. Popov, B. A., and G. S. Tesler. 1984. *Vychislenie funktsiy na EVM: Spravochnik* [Handbook for special functions]. Kiev: Naukova Dumka. 599 p.
11. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyah [Parametric statistical and analytical modeling of distributions in stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):4–16.

Received April 7, 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

О РАНДОМИЗАЦИИ В МЕТОДЕ ГРУППОВОГО СРЕДНЕГО ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЫСОКООТВЕТСТВЕННЫХ СИСТЕМ*

К. А. Калинина¹, Е. В. Морозов²

Аннотация: Рассматривается проблема оценивания эффективной пропускной способности (ЭПС) высокοответственных стохастических систем обслуживания. Значительное внимание уделяется причинам завышения (*переоценивания*) величины ЭПС, получаемой на основе регенеративного метода. Результаты численного моделирования показывают, что основным фактором переоценивания является случайное суммирование нагрузки на циклах регенерации системы. Полученные результаты показывают преимущество рандомизации величины группы данных при оценке ЭПС в высокοответственных системах. В таких системах превышение заданной вероятности потери данных (или переполнения буфера) является неприемлемым нарушением качества сервиса (*quality of service*, QoS). Для оценки ЭПС в таких системах предлагается использовать модификацию известного метода группового среднего, но с рандомизированным размером блока.

Ключевые слова: эффективная пропускная способность; регенеративное оценивание; рандомизация; QoS; высокοответственная система; метод группового среднего

DOI: 10.14357/08696527170403

1 Введение

Важной задачей при разработке и поддержке современных инфокоммуникационных систем является возможность выбора таких режимов работы, которые обеспечивают определенные требования качества обслуживания (QoS).

Эти требования, отражающие интересы пользователя, должны быть сбалансированы с интересами разработчиков или провайдеров услуг, что приводит к необходимости постановки и решения соответствующих оптимизационных задач. Например, при использовании высокопроизводительных систем важно уметь

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-07-02341, 15-07-02354 и 15-07-02360) и гранта Президента РФ МК-1641.2017.1.

¹Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук, kalininaksenia90@gmail.ru

²Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук; Петрозаводский государственный университет, emorozov@karelia.ru

решать проблему уменьшения энергопотребления, сохраняя при этом требуемые гарантии QoS. В частности, такими требованиями могут быть ограничения на среднее время ожидания выполнения задания или на вероятность того, что время ожидания задания в очереди превысит заданный порог [1].

Параметры QoS выбираются в зависимости от особенностей системы и тех задач, которые она решает. В теории стохастических систем обслуживания одним из важных параметров QoS является вероятность превышения стационарным процессом незавершенной работы W некоторого заданного (высокого) уровня b . Этот параметр QoS является основой расчета и оценивания *эффективной пропускной способности* обслуживающей системы (см. *effective bandwidth* в [2–4]). Более точно, под ЭПС понимается такое значение мощности C обслуживающего прибора, при котором вероятность превышения стационарным процессом нагрузки W заданного уровня b не превышает требуемого (малого) значения Γ , т. е.

$$P_b := \mathbb{P}(W > b) \leq \Gamma. \quad (1)$$

Инфокоммуникационные системы, для которых нарушение требования (1) является крайне нежелательным (или неприемлемым), будем называть *высокоответственными* [5]. Предыдущие результаты оценивания ЭПС на основе метода группового среднего и регенеративного метода представлены в работах [6–9]. Они показали, что *регенеративная оценка* (см. ниже) гарантирует выполнение требования (1), однако завышает требуемую ЭПС на некоторую величину Δ по сравнению с минимальной ЭПС, обеспечивающей (1). С другой стороны, оценка по *методу группового среднего* всегда нарушает требование (1). Из этого следует, что в высокоответственных системах регенеративная оценка ЭПС предпочтительнее, однако важно исследовать более детально причины и величину переоценивания с целью ее минимизации [6, 9, 10].

В данной статье основное внимание уделено анализу влияния *случайного суммирования* (более точно, случайной длины цикла регенерации или длины блока) как основной причины переоценивания.

Как показало имитационное моделирование, в ациклической сети величина Δ растет при уменьшении вероятности Γ [6, 7], а в tandemной сети — также при увеличении числа узлов [10]. В работе [6] также приведены результаты численной оценки Δ при использовании регенеративного метода и метода группового среднего.

В данной статье на примере моделирования tandemной системы с двумя узлами показан ведущий вклад рандомизации в значение величины Δ . Этот результат позволяет предложить для оценивания ЭПС в высокоответственных системах модификацию метода группового среднего с заимствованной из регенеративного метода идеей рандомизации величины блока группируемых данных.

Полученные результаты могут быть полезны провайдерам и пользователям высокоответственных сетей при оценивании величины ЭПС, обеспечивающей требование (1).

Остальная часть статьи организована следующим образом. В разд. 2 представлены основные методы оценивания ЭПС и их краткий сравнительный анализ. В частности, в подразд. 2.2 рассматривается так называемый дельта-метод доверительного оценивания нелинейной функции математических ожиданий пары случайных величин (с.в.), возникающей при регенеративном оценивании. Раздел 3 посвящен численному исследованию величины Δ . В частности, исследуются независимые и зависимые данные на цикле регенерации (подразд. 3.1). В подразд. 3.2 изучается величина переоценивания ЭПС второго узла сети с помощью групп случайного размера, не связанного с регенеративной структурой процесса в сети. Наконец, в подразд. 3.3 предложен метод группировки данных, объединяющий оба рассмотренных метода.

2 Методы оценивания эффективной пропускной способности

Из теории больших уклонений следует, что (в широких условиях) требуемая величина ЭПС удовлетворяет соотношению:

$$C := \frac{\Lambda(\theta^*)}{\theta^*}, \quad (2)$$

где *пределная логарифмическая производящая функция моментов* Λ определяется как

$$\Lambda(\theta^*) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \ln \mathbb{E} e^{\theta^* \sum_{i=0}^{n-1} v_i} \quad (3)$$

(в предположении, что предел существует), а $\{v_i\}$ есть входная (случайная) последовательность объемов работы, поступающей в систему на единичных интервалах времени $[i, i + 1]$, $i \geq 0$ [2, 11, 12]. Параметр θ^* находится на основе экспоненциальной асимптотики вероятности (1):

$$P_b = \Gamma \sim e^{-b\theta^*}, \quad b \rightarrow \infty$$

($x \sim y$ означает $x/y \rightarrow 1$) и определяется соотношением

$$\theta^* = -\frac{\ln \Gamma}{b} > 0.$$

(Подробное введение в теорию ЭПС можно найти в [3].) Основная сложность применения формулы (2) заключается в вычислении предельной функции Λ . Когда с.в. $\{v_i\}$ — независимые, одинаково распределенные (н.о.р.), функция Λ принимает вид:

$$\Lambda(\theta^*) = \ln \mathbb{E} e^{\theta^* v},$$

где с.в. v является стохастической копией с.в. v_i . В этом случае аналитическое выражение для функции Λ можно найти для некоторых распределений [10]. Когда с.в. $\{v_i\}$ зависимы, неизвестное значение Λ заменяется в общем случае выборочной оценкой

$$\Lambda_k(\theta) := \ln \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} e^{\theta v_i} \quad (4)$$

и, кроме того, используются специальные методы группировки данных, для того чтобы обойти трудности, связанные с зависимостью. Кратко опишем два основных метода, использованных в предыдущих работах (подробный анализ можно найти в [7–10]).

2.1 Точечные оценки эффективной пропускной способности

Для вычисления функции (3) для зависимых $\{v_i\}$ используем два основных метода.

Метод группового среднего (batch-mean method) [6, 7, 10] является наиболее распространенным при построении оценки (4), при котором последовательность $\{v_i\}$ разбивается на блоки фиксированной длины B следующим образом:

$$\hat{X}_i := \sum_{j=(i-1)B+1}^{iB} v_j, \quad i \geq 1. \quad (5)$$

Основная идея состоит в том, что при больших B блоки (5) можно считать (приближенно) н.о.р. Тогда соответствующая выборочная оценка функции Λ , построенная по k блокам, имеет вид:

$$\hat{\Lambda}_k(\theta, B) = \frac{1}{B} \ln \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k e^{\theta \hat{X}_i},$$

а оценка ЭПС определяется следующим образом:

$$\hat{C}_{bm}(\theta^*, B) = \frac{\hat{\Lambda}_k(\theta^*, B)}{\theta^*}. \quad (6)$$

В *регенеративном методе* последовательность с.в. $\{v_i\}$ предполагается регенеративной с моментами регенерации $\{\beta_i\}$, разбивающими ее на н.о.р. *циклы регенерации* с суммарной нагрузкой, поступающей на i -м цикле, равной

$$X_i := \sum_{j=\beta_i}^{\beta_{i+1}-1} v_j, \quad i \geq 0, \quad \beta_0 := 0.$$

На основе методов теории восстановления и теории регенерирующих процессов можно ожидать, что функция Λ в данном случае примет следующий вид [6, 7, 10]:

$$\Lambda(\theta^*) = \frac{\ln \mathbb{E} e^{\theta^* X}}{\mathbb{E} \beta}, \quad (7)$$

что, в свою очередь, влечет такой вид искомой ЭПС:

$$\frac{\ln \mathbb{E} e^{\theta^* X}}{\theta^* \mathbb{E} \beta}. \quad (8)$$

В этом случае выборочная оценка функции $\Lambda(\theta^*)$ имеет вид:

$$\hat{\Lambda}(\theta^*, R) := \frac{k}{\beta_k} \ln \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k e^{\theta^* X_i}, \quad k \geq 1,$$

а оценка ЭПС определяется как

$$\hat{C}_R(\theta^*) := \frac{\hat{\Lambda}(\theta^*, R)}{\theta^*}. \quad (9)$$

Однако результаты имитационного моделирования во всех случаях показали, что выражение (7) дает *верхнюю границу* ЭПС [9, 10]. Хотя этот результат не удалось в общем случае строго доказать, воспроизведем его обоснование в [10] для случая н.о.р. $\{v_i\}$, не зависящих от индекса суммирования β . Действительно, учитывая свойство условного математического ожидания, имеем:

$$\ln \mathbb{E} e^{\theta^* X} = \ln \mathbb{E} \left(\mathbb{E} \left(e^{\theta^* \sum_{i=1}^\beta v_i} | \beta \right) \right) = \ln \mathbb{E} \left[\mathbb{E} e^{\theta^* v} \right]^\beta,$$

а затем, применяя неравенство Иенсена, получаем из (8) требуемое неравенство:

$$\frac{\ln \mathbb{E} e^{\theta^* X}}{\theta^* \mathbb{E} \beta} = \frac{\ln \mathbb{E} \left[\mathbb{E} e^{\theta^* v} \right]^\beta}{\theta^* \mathbb{E} \beta} \geq \frac{\mathbb{E} \ln \left[\mathbb{E} e^{\theta^* v} \right]^\beta}{\theta^* \mathbb{E} \beta} = \frac{\ln \mathbb{E} e^{\theta^* v}}{\theta^*} = C. \quad (10)$$

Для дальнейшего анализа важно обсудить отличие рассмотренных оценок. Метод группового среднего прост в реализации, но игнорирует возможную зависимость данных, принадлежащих разным блокам, и, кроме того, размер блока B выбирается произвольно. Построенная на его основе оценка ЭПС (6) во всех исследованных случаях *недооценивает* требуемую величину ЭПС [6, 10]. Иными словами, использование данной оценки приводит к нарушению ключевого требования (1), что неприемлемо в высокоответственных системах. Регенеративная же оценка ЭПС строится на основе действительно независимых блоков (циклов регенерации), но завышает (*переоценивает*) значение ЭПС на величину Δ . В высокоответственных системах последнее предпочтительнее, однако избыточная мощность Δ снижает другие показатели эффективности системы.

2.2 Интервальная оценка функции Λ

Для построения интервальной оценки функции Λ в (7) будем использовать так называемый *дельта-метод* [13]. Напомним, что V есть (типичная) суммарная нагрузка на цикле регенерации, а β — типичная длина цикла. Дельта-метод позволяет получить интервальную оценку некоторой (нелинейной) функции f математических ожиданий пары заданных с.в. (X, Y) . Идея метода состоит в разложении функции f в ряд Тейлора до линейных слагаемых, а затем в использовании центральной предельной теоремы. В рассматриваемом случае положим $X = e^{\theta^* V}$, $Y = \beta$. Также обозначим вектор математических ожиданий $M = (\mathbb{E} X, \mathbb{E} Y)^T$, где индекс T означает транспонирование. В данном случае, ввиду (7), требуется оценить функцию

$$f(M) := \frac{\ln \mathbb{E} X}{\mathbb{E} Y}.$$

Обозначим через (x_i, y_i) реализации двумерной с.в. (X, Y) , $i = 1, \dots, n$, и запишем соответствующие выборочные оценки:

$$\hat{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \hat{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad \hat{M} = (\hat{X}, \hat{Y}); \quad f(\hat{M}) = \frac{\ln \hat{X}}{\hat{Y}}.$$

Рассмотрим двумерную с.в. $Z = (X, Y)^T$ и с.в. $S = \nabla f(M)(Z - M)$, где $\nabla f(M)$ обозначает градиент, который в данном случае равен

$$\nabla f(M) = \left(\frac{1}{\mathbb{E} X \mathbb{E} Y}, -\frac{\ln \mathbb{E} X}{(\mathbb{E} Y)^2} \right).$$

Тогда с.в. S принимает вид:

$$\begin{aligned} S &= \nabla f(M)(Z - M) = \left(\frac{1}{\mathbb{E} X \mathbb{E} Y}, -\frac{\ln \mathbb{E} X}{(\mathbb{E} Y)^2} \right) (X - \mathbb{E} X, Y - \mathbb{E} Y)^T = \\ &= \frac{X}{\mathbb{E} X \mathbb{E} Y} - \frac{Y \ln \mathbb{E} X}{(\mathbb{E} Y)^2} - \frac{1 - \ln \mathbb{E} X}{\mathbb{E} Y}. \end{aligned}$$

Как следует из [13], имеет место сходимость по распределению к нормальной с.в.

$$\sqrt{n} \left(f(\hat{M}) - f(M) \right) \xrightarrow{d} N(0; \sigma^2), \quad n \rightarrow \infty,$$

где σ^2 есть дисперсия с.в. S , стандартная выборочная оценка которой равна

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (s_i - \hat{S})^2,$$

выборочное среднее

$$\hat{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i,$$

а реализации s_i с.в. S определяются как

$$s_i = \frac{x_i}{\hat{X}\hat{Y}} - \frac{y_i \ln \hat{X}}{(\hat{Y})^2} - \frac{1 - \ln \hat{X}}{\hat{Y}}.$$

В результате $(1 - \gamma)100\%$ -ный доверительный интервал для величины $\Lambda(\theta^*) = f(M)$ принимает вид: $[f(\hat{M}) \pm z_\gamma \hat{\sigma}/\sqrt{n}]$, где квантиль $z_\gamma = \Phi^{-1}(\gamma/2)$ (здесь Φ — функция Лапласа, а γ — заданная доверительная вероятность).

2.3 Оценивание эффективной пропускной способности на примере тандемной сети

В этом подразделе приведены результаты доверительного оценивания ЭПС второго узла двухузловой тандемной сети на основе дельта-метода, а также значения точечных оценок (6) и (9).

Эксперимент 1. На первый узел поступает пуассоновский поток заявок с параметром $\lambda = 0,4$, а время обслуживания распределено экспоненциально с параметром $\mu = 1$. Требуется найти ЭПС второго узла, обеспечивающую требование (1) при $b = 20$ и значениях Γ , заданных в табл. 1. Моментами регенерации сети считаются моменты прихода заявок, не ожидающих во втором узле. (Подробнее о возможных типах регенерации см. [7, 10].) Входные данные $\{v_i\}$ на втором узле связаны следующей зависимостью (простейший вид автокорреляции):

$$v_i = v_{i-1} + \eta_i, \quad 1 \leq i \leq \beta, \quad (11)$$

где с.в. $\{\eta_i\}$ н.о.р., с.в. η_i равномерно распределена на интервале $[-v_{i-1}/2; v_{i-1}/2]$, с.в. β — длина цикла регенерации, а с.в. v_0 имеет распределение Вейбулла с функцией распределения $F(x) = 1 - e^{-x^{0,4}}$, $x \geq 0$. Для искомой величины C построены регенеративная оценка \hat{C}_R , оценка методом

Таблица 1 Точечные и интервальные оценки ЭПС второго узла сети

Γ	\hat{C}_{BM}	\hat{C}_R	$\hat{\Gamma}_{BM}$	$\hat{\Gamma}_R$	ConfInt
10^{-4}	2,528	2,967	$9,33 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	(2,503; 3,057)
10^{-5}	3,064	3,693	$4,51 \cdot 10^{-4}$	$3,52 \cdot 10^{-6}$	(2,856; 3,751)

группового среднего \hat{C}_{BM} (с размером блока $B = 10$) и доверительный интервал с уровнем надежности $\gamma = 0,90$ на основе $k = 1000$ блоков/циклов (см. табл. 1). Там же приведены оценки $\hat{\Gamma}_R$ и $\hat{\Gamma}_{BM}$ вероятности превышения уровня $b = 20$ в случае, когда второй узел работает со скоростью $C = \hat{C}_R$ и \hat{C}_{BM} соответственно. При использовании \hat{C}_{BM} оценка $\hat{\Gamma}_{BM} > \Gamma$, т. е. нарушается требование (1), оценка же \hat{C}_R всегда дает $\hat{\Gamma}_R < \Gamma$, обеспечивая требование (1). В табл. 1 приведены также доверительные интервалы (ConfInt).

3 Численное исследование величины Δ

Оценка (9) имеет ограничения, связанные со сложностью (а иногда и невозможностью) идентификации регенерации в реальных сетях. Кроме того, получаемая с ее помощью избыточная мощность Δ влечет дополнительные затраты. Ниже рассматриваются различные сценарии построения оценки ЭПС с целью уменьшения Δ .

3.1 Анализ на основе регенерации

Эксперимент 2. Независимые данные на цикле регенерации. Как следует из (10), для н.о.р. $\{v_i\}$, не зависящих от β , регенеративная оценка является верхней границей ЭПС. Покажем это на примере тандемной сети и показательных н.о.р. $\{v_i\}$ с параметром $\lambda = 2$ для значений Γ , указанных в табл. 2. Длина цикла регенерации β равна числу приходов в узел 2 заявок, застающих его пустым. Стого говоря, β и $\{v_i\}$ зависимы и β является рандомизированным моментом остановки относительно $\{v_i\}$ [14]. (В этой связи см. понятие квазирегенерации [15].) Однако будем игнорировать это обстоятельство. Используя оценку (9) в качестве ЭПС, т. е. полагая $C = \hat{C}_R$, получим оценку $\hat{\Gamma}_R$ вероятности Γ превышения уровня $b = 10$. Затем находим Δ и оценку $\hat{\Gamma}_\Delta$, соответствующую значениюю ЭПС $C = (1 - \Delta)\hat{C}_R$. Таким образом, $\Delta := (\hat{C}_R - C)/\hat{C}_R$ есть «избыточная» доля пропускной способности (как ее и определяли ранее). Заметим, что условие (1) нарушается при $C \leqslant (1 - \Delta)\hat{C}_R$ и выполняется при $C > (1 - \Delta)\hat{C}_R$. Результаты табл. 2 хорошо согласуются с (10): \hat{C}_R является верхней границей ЭПС.

Таблица 2 Независимые данные

Γ	\hat{C}_R	$\hat{\Gamma}_R$	Δ	$\hat{\Gamma}_\Delta$
10^{-4}	2,735	$8,49 \cdot 10^{-5}$	0,06	$2,54 \cdot 10^{-4}$
10^{-5}	3,429	$5,03 \cdot 10^{-6}$	0,07	$1,63 \cdot 10^{-5}$
10^{-6}	3,960	$9,66 \cdot 10^{-7}$	0,04	$1,96 \cdot 10^{-6}$

Эксперимент 3. Зависимые данные на цикле регенерации. Для той же tandemной системы рассмотрим зависимость оценки вероятности $\hat{\Gamma}$ от величины Δ , когда данные на цикле связаны зависимостью (11). Для этого вычисляется оценка \hat{C}_R (9), а затем оценка $\hat{\Gamma}$ при $C = \hat{C}_R$. Для более детального анализа построен ряд значений ЭПС:

$$C_1 = \hat{C}_R; C_2 = 0,97\hat{C}_R; C_3 = 0,94\hat{C}_R; \dots; C_6 = 0,85\hat{C}_R$$

и для i -го значения C_i найдена оценка $\hat{\Gamma}_i$ путем моделирования. (Данный диапазон изменения C выбран с учетом полученной ранее величины переоценивания.) Результаты экспериментов представлены на рис. 1. Видно, что условие (1) впервые нарушается при уменьшении C примерно до величины $0,90\hat{C}_R$, причем до этого момента $\hat{\Gamma}$ растет достаточно медленно, а далее — очень быстро.

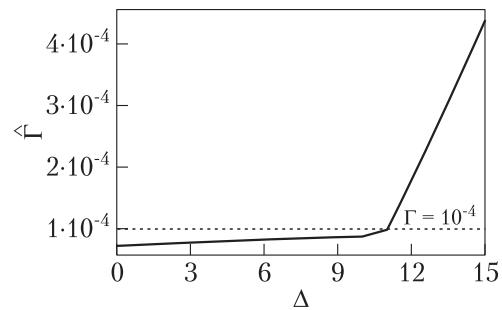


Рис. 1 Тандемная сеть, $\hat{C}_R = 2,97$: зависимость $\hat{\Gamma}$ от Δ

3.2 Зависимость Δ от рандомизации размера группы

Выше была исследована величина Δ на основе циклов регенерации tandemной системы. Для проверки вклада случайного суммирования в величину Δ откажемся от анализа системы на циклах регенерации и рассмотрим «искусственные» циклы, не связанные с состоянием системы. Иными словами, будем рассматривать группы данных $\{v_i\}$ случайной длины β (с заданным распределением), не зависящей от $\{v_i\}$. Такие искусственные циклы назовем *рандомизированными группами*, поскольку они, вообще говоря, уже не связаны с регенеративной структурой процессов в системе.

Эксперимент 4. Независимые данные в рандомизированной группе. Рассмотрим tandemную сеть, описанную выше, с независимыми показательными $\{v_i\}$ с параметром $\lambda = 2$ и вероятностью $\Gamma = 10^{-5}$. Оценка ЭПС строится по аналогии с регенеративной оценкой (9), однако длина группы β распределена либо по закону Пуассона с параметром λ (табл. 3), либо по закону Ципфа (дискретный аналог распределения Парето, табл. 4):

$$p_i = \frac{p_0}{i}, \quad i = 1, \dots, \alpha, \quad (12)$$

где $p_0 = (p_1 + \dots + p_\alpha)^{-1}$.

Таблица 3 Независимые данные, группа случайной длины, закон Пуассона

λ	$\text{Var } \hat{\beta}$	$\hat{\Gamma}_a$	Δ_a	$\hat{\Gamma}_{\Delta_a}$
5	5,057	$2,24 \cdot 10^{-6}$	0,10	$1,20 \cdot 10^{-5}$
7	7,291	$1,65 \cdot 10^{-6}$	0,11	$2,33 \cdot 10^{-5}$
10	9,756	$1,07 \cdot 10^{-7}$	0,13	$1,15 \cdot 10^{-5}$

Таблица 4 Независимые данные, группа случайной длины, закон Ципфа

α	$\text{Var } \hat{\beta}$	$\hat{\Gamma}_a$	Δ_a	$\hat{\Gamma}_{\Delta_a}$
8	4,435	$2,31 \cdot 10^{-6}$	0,12	$1,03 \cdot 10^{-5}$
10	7,290	$5,07 \cdot 10^{-6}$	0,12	$2,54 \cdot 10^{-5}$
12	9,491	$6,22 \cdot 10^{-7}$	0,13	$2,19 \cdot 10^{-5}$

Далее найдена оценка $\hat{\Gamma}_a$ вероятности превышения уровня $b = 10$, когда $C = \hat{C}_a$. Затем на основе величины переоценивания Δ_a вычислена оценка вероятности переполнения $\hat{\Gamma}_{\Delta_a}$ при $C = (1 - \Delta_a)\hat{C}_a$. Как показывают табл. 3 и 4, в этом случае условие (1) уже нарушается, и поэтому искомое значение ЭПС удовлетворяет условию $C > (1 - \Delta_a)\hat{C}_a$.

Таблицы 3 и 4 показывают, что оценка, построенная по группам независимых данных случайной длины, дает величину Δ_a , сравнимую с той, что возникает при регенеративном оценивании. Это подкрепляет предположение о том, что переоценивание в основном зависит от случайного суммирования (рандомизации) нагрузки.

По аналогии с изучением циклов регенерации рассмотрим зависимые данные только внутри (рандомизированных) групп, а затем и зависимые группы.

Эксперимент 5. Независимые группы зависимых данных. Изучим зависимость между дисперсией размера группы $\text{Var } \beta$ и величиной переоценивания Δ_a . Этот вопрос важен для выбора распределения размера группы при отказе от анализа реальных циклов регенерации. Для той же системы построим оценку ЭПС \hat{C}_a аналогично оценке (9), где длина цикла имеет распределение Пуассона с параметром λ (табл. 5) либо распределение Ципфа (12) (значения параметра α приведены в табл. 6). Вычислена также оценка $\hat{\Gamma}_a$ вероятности превышения и величина переоценивания Δ_a при $C = \hat{C}_a$, а также оценка $\hat{\Gamma}_{\Delta_a}$ при $C = (1 - \Delta_a)\hat{C}_a$.

Таблицы 5 и 6 показывают, что рост дисперсии размера группы $\text{Var } \beta$ вызывает рост и величины переоценивания Δ_a . (Величина Δ_a зависит и от

Таблица 5 Зависимые группы случайной длины, закон Пуассона

λ	$\text{Var } \hat{\beta}$	$\hat{\Gamma}_a$	Δ_a	$\hat{\Gamma}_{\Delta_a}$
5	5,132	$1,54 \cdot 10^{-6}$	0,11	$2,43 \cdot 10^{-5}$
7	7,098	$2,33 \cdot 10^{-6}$	0,12	$1,08 \cdot 10^{-5}$
10	9,316	$1,68 \cdot 10^{-7}$	0,13	$1,18 \cdot 10^{-5}$

Таблица 6 Зависимые группы случайной длины, закон Ципфа

α	$\text{Var } \hat{\beta}$	$\hat{\Gamma}_a$	Δ_a	$\hat{\Gamma}_{\Delta_a}$
8	4,312	$2,44 \cdot 10^{-6}$	0,12	$1,56 \cdot 10^{-5}$
10	7,552	$6,91 \cdot 10^{-6}$	0,13	$1,09 \cdot 10^{-5}$
12	9,716	$3,15 \cdot 10^{-7}$	0,13	$1,13 \cdot 10^{-5}$

распределения β , см. также [9].) Приведенные результаты подкрепляют предположение о том, что основное влияние на величину Δ оказывает рандомизация величины группы.

Эксперимент 6. Зависимые группы. Таким образом, случайное суммирование как по циклам регенерации, так и независимо от них обеспечивает требуемое условие (1) в случае как независимых, так и зависимых данных (внутри цикла или группы).

Остается изучить влияние на величину Δ зависимости между группами данных. Пусть все с.в. $\{v_i\}$ связаны зависимостью (11), не ограниченной пределами данной группы. Построим оценку \hat{C}_a аналогично оценке (9), где размер группы распределен либо по закону Пуассона с параметром λ (табл. 7), либо по закону Ципфа (12) (значения параметра α даны в табл. 8). Для $C = \hat{C}_a$ приведены оценка $\hat{\Gamma}_a$, величина Δ_a и оценка вероятности переполнения $\hat{\Gamma}_{\Delta_a}$ при $C = (1 - \Delta_a)\hat{C}_a$.

Таблица 7 Зависимые группы случайной длины, закон Пуассона

λ	$\text{Var } \hat{\beta}$	$\hat{\Gamma}_a$	Δ_a	$\hat{\Gamma}_{\Delta_a}$
5	5,313	$1,44 \cdot 10^{-6}$	0,12	$1,03 \cdot 10^{-5}$
7	7,572	$2,53 \cdot 10^{-6}$	0,12	$1,98 \cdot 10^{-5}$
10	10,066	$5,07 \cdot 10^{-7}$	0,13	$1,10 \cdot 10^{-5}$

Таблица 8 Зависимые группы случайной длины, закон Ципфа

α	$\text{Var } \hat{\beta}$	$\bar{\Gamma}_a$	Δ_a	$\bar{\Gamma}_{\Delta_a}$
8	4,803	$5,14 \cdot 10^{-6}$	0,11	$1,84 \cdot 10^{-5}$
10	6,599	$2,97 \cdot 10^{-6}$	0,13	$1,42 \cdot 10^{-5}$
12	10,075	$4,37 \cdot 10^{-7}$	0,14	$1,05 \cdot 10^{-5}$

Таблицы 7 и 8 показывают, что с ростом дисперсии $\text{Var } \beta$ растет и переоценивание Δ_a , однако оно меньше, чем в предыдущих экспериментах.

3.3 Рандомизация в методе группового среднего

Проведенный анализ позволяет предложить следующий подход к построению оценки ЭПС в высокоточных системах. Поскольку оценка группового среднего недооценивает ЭПС, а рандомизация размера группы переоценивает ее (вне зависимости от наличия регенеративной структуры), то естественно модифицировать стандартный метод группового среднего путем *рандомизации величины группы*. Чтобы объединить преимущества обоих методов, будем моделировать исходную тандемную сеть, строить оценку ЭПС для фиксированного размера группы, а затем оценку для соответствующим образом рандомизированной группы.

Эксперимент 7. Зависимые данные внутри независимых рандомизированных групп. Выбираем произвольно размер группы (в эксперименте $B = 10$). Затем рандомизируем его, взяв в качестве β с.в., равномерно распределенную в интервале $[(1 - p)B; (1 + p)B]$, где величина p изменяется в диапазоне $[0; 0,15]$. (Данный диапазон соответствует тому, что величина переоценивания не превышает 15% величины ЭПС.) В табл. 9 приведена зависимость Δ от оценки

Таблица 9 Рандомизация длины циклов β , $\Gamma = 10^{-5}$

p	$\text{Var } \beta$	$\text{Var } \hat{\beta}$	\hat{C}	$\hat{\Gamma}$	Δ	$\hat{\Gamma}_{\Delta}$
0	0	0	2,7155	$9,84 \cdot 10^{-3}$	-0,10	$3,65 \cdot 10^{-5}$
0,03	0,0300	0,0289	2,8612	$2,75 \cdot 10^{-4}$	-0,08	$1,04 \cdot 10^{-5}$
0,05	0,0833	0,0804	2,9777	$6,03 \cdot 10^{-4}$	-0,06	$2,73 \cdot 10^{-5}$
0,07	0,1633	0,1711	3,0682	$5,28 \cdot 10^{-4}$	-0,05	$4,38 \cdot 10^{-5}$
0,10	0,3333	0,3195	3,2431	$9,36 \cdot 10^{-5}$	0,03	$3,66 \cdot 10^{-5}$
0,12	0,4800	0,4682	3,4509	$3,89 \cdot 10^{-5}$	0	$1,05 \cdot 10^{-5}$
0,15	0,7500	0,7743	3,5461	$8,02 \cdot 10^{-6}$	0,06	$2,90 \cdot 10^{-5}$

дисперсии $\text{Var } \hat{\beta}$. При значении $p = 0,12$ переоценивание практически равно нулю, указывая «точное» значение ЭПС, равное 3,451.

Таким образом, рандомизация позволяет перейти от недооценивания ЭПС к переоцениванию, с обнаружением границы между этими двумя сценариями.

Эксперимент 8. Зависимые рандомизированные группы. Рассмотрим оценку для тандемной системы в случае, когда зависимость (11) не ограничена одной группой, т. е. группы оказываются зависимыми. Рандомизируем размер группы с помощью равномерного распределения на $[(1-p)B; (1+p)B]$, $p \in [0,07; 0,17]$. Такой выбор p опирается на результаты эксперимента 7. Полученная оценка ЭПС обозначена \hat{C}_d , а соответствующая ей оценка вероятности превышения — через $\hat{\Gamma}_d$. Результаты представлены в табл. 10. Для сравнения также приведена оценка \hat{C} и соответствующая ей оценка вероятности превышения $\hat{\Gamma}$ из эксперимента 7. Видно, что переоценивание в случае зависимых групп начинается при меньших значениях p , чем в эксперименте 7.

Таблица 10 Зависимость внутри группы и между группами, $\Gamma = 10^{-5}$

p	\hat{C}	\hat{C}_d	$\hat{\Gamma}$	$\hat{\Gamma}_d$	Δ	Δ_d
0,07	3,132	3,179	$6,72 \cdot 10^{-4}$	$3,01 \cdot 10^{-4}$	-0,05	-0,01
0,10	3,210	3,266	$3,97 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	-0,03	0,02
0,12	3,472	3,501	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$8,91 \cdot 10^{-6}$	0	0,05
0,15	3,547	3,862	$9,03 \cdot 10^{-5}$	$4,73 \cdot 10^{-6}$	0,06	0,10
0,17	3,628	3,945	$2,72 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	0,07	0,13

Эксперимент 9. Сравним влияние на величину Δ случайного размера группы с влиянием зависимости между группами. Для этого строится оценка \hat{C}_R по циклам регенерации исходной тандемной системы (данные внутри цикла зависмы, как в (11)) и параллельно строится оценка \hat{C}_a методом группового среднего (для той же последовательности (11)), причем размер группы *совпадает с длиной цикла регенерации системы*. Таким образом, реальная регенеративная структура «накладывается» на последовательность зависимых данных. Для заданной $\Gamma = 10^{-4}$ на рис. 2 представлена зависимость между величиной переоценивания Δ и соответству-

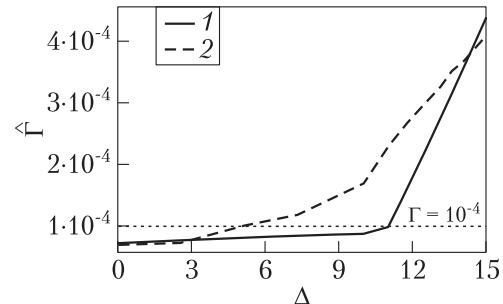


Рис. 2 Зависимость $\hat{\Gamma}$ от Δ : 1 — независимые циклы; 2 — зависимые группы

ющими оценками вероятности превышения, когда в качестве ЭПС используются соответственно оценки $\hat{C}_R = 2,97$ и $\hat{C}_a = 2,78$. Видно, что зависимость между группами сгладила рост Δ и оценка $\hat{\Gamma}_a$ (построенная при использовании \hat{C}_a) оказывается близкой к точному значению Γ уже при уменьшении \hat{C}_a до величины $0,95\hat{C}_a$.

Проведенные эксперименты показывают, что рандомизация размера группы (блока) в методе группового среднего может быть эффективным способом оценки ЭПС в высокот ответственных инфокоммуникационных системах.

Заключение

В статье рассматривается оценивание ЭПС высокот ответственной системы с помощью регенеративного метода и метода группового среднего. Особое внимание уделяется роли случайного суммирования в обеспечении требуемого QoS. Предложен метод рандомизации размера группы данных в методе группового среднего. Этот метод является естественной комбинацией двух описанных выше методов, где идея рандомизации подсказана регенеративным методом. Результаты моделирования показывают, что построенная на основе данного подхода оценка ЭПС обеспечивает гарантию QoS. Эксперименты также позволяют сделать некоторые выводы относительно корректировки полученной оценки ЭПС с целью повышения эффективности работы системы.

Литература

1. Morozov E., Rumyantsev A. A state-dependent control for green computing // Information sciences and systems / Eds. O. H. Abdelrahman, E. Gelenbe, G. Gorbil, R. Lent. — Lecture notes in electrical engineering ser. — Springer International Publishing, 2015. Vol. 363. P. 57–67.
2. Glynn P. W., Whitt W. Logarithmic asymptotics for steady-state tail probabilities in a single-server queue // J. Appl. Probab., 1994. Vol. 31. P. 131–156.
3. Kelly F. Notes on effective bandwidths // Stochastic Networks: Theory and applications / Eds. F. P. Kelly, S. Zachary, I. Ziedins. — Royal Statistical Society lecture notes ser. 4. — Oxford University Press, 1996. P. 141–168.
4. Lewis J. T., Russell R. An introduction to large deviation for teletraffic engineers. DIAS Technical Report DIAS-TP 97-16, 1997.
5. Коваленко И. Н. Анализ редких событий при оценке эффективности и надежности систем. — М: Советское радио, 1980. 239 с.
6. Borodina A., Kalinina K., Morozov E. On the accuracy of the effective bandwidth regenerative estimation // Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems. — St.-Petersburg: IEEE, 2014. P. 652–656.
7. Morozov E., Kalinina K. On the effective bandwidth estimation in communication network // 29th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings, 2015. P. 423–429.

8. Калинина К. Об эффективной пропускной способности узлов коммуникационной сети // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Мат-лы Всеросс. конф. с международным участием. — М.: РУДН, 2015. С. 24–26.
9. Kalinina K., Morozov E., Rykov V. Effective bandwidth estimation in highly reliable regenerative networks // 2nd Symposium (International) on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management Proceedings. — Israel, 2016. P. 323–327.
10. Бородина А. В., Морозов Е. В. Оценивание эффективной пропускной способности узла в инфокоммуникационной tandemной сети // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 2. С. 37–54.
11. Chang C.-S. Performance guarantees in communication networks. — London: Springer-Verlag, 2000. 405 p.
12. Ganesh A., O'Connell N., Wischik D. Big queues. — Lecture notes in mathematics ser. — Springer, 2004. 260 p.
13. Asmussen S., Glynn P. Stochastic simulation: Algorithms and analysis. — Springer, 2007. 476 p.
14. Asmussen S. Applied probability and queues. — 2nd ed. — Springer, 2003. 451 p.
15. Belyy A., Morozov E. Quasi-regenerative and A-cycle queueing simulation // Advances in Methods of Modern Information Technology: Finnish Data Processing Week at the Petrozavodsk State University Proceedings. — Petrozavodsk, 2005. P. 157–170.

Поступила в редакцию 11.05.17

EFFECTIVE BANDWIDTH ESTIMATION OF HIGHLY RESPONSIBLE SYSTEMS BY THE RANDOMIZED BATCH MEAN METHOD

K. A. Kalinina¹ and E. V. Morozov^{1,2}

¹Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 11 Pushkinskaya Str., Petrozavodsk 185910, Russian Federation

²Petrozavodsk State University, 33 Lenina Pr., Petrozavodsk 185910, Russian Federation

Abstract: The effective bandwidth (EB) estimation of highly responsible systems is considered. A special attention is paid to the reasons causing overestimation of the EB obtained by the regenerative method. Simulations show that the basic reason of the overestimation is the random summation of the input data over regeneration cycles. Numerical results demonstrate an advantage of the randomizing for the EB estimation of highly responsible systems. If in such a system the workload excesses the predetermined threshold (or overloads the finite buffer), then an unacceptable violation of the QoS (quality of service)

requirement happens. To estimate the EB in such systems, the modified batch means method with randomized blocks is proposed.

Keywords: effective bandwidth; regenerative estimation; randomizing; QoS; highly responsible system; batch means method

DOI: 10.14357/08696527170403

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 15-07-02341, 15-07-02354, and 15-07-02360) and by the Russian Federation President Grant MK-1641.2017.1.

References

1. Morozov, E., and A. Rumyantsev. 2015. A state-dependent control for green computing. *Information sciences and systems*. Eds. O. H. Abdelrahman, E. Gelenbe, G. Gorbil, and R. Lent. Lecture notes in electrical engineering ser. Springer International Publishing. 363:57–67.
2. Glynn, P. W., and W. Whitt. 1994. Logarithmic asymptotics for steady-state tail probabilities in a single-server queue. *J. Appl. Probab.* 31:131–156.
3. Kelly, F. 1996. Notes on effective bandwidths. *Stochastic networks: Theory and applications*. Eds. F. P. Kelly, S. Zachary, and I. Ziedins. Royal Statistical Society lecture notes ser. 4. Oxford University Press. 141–168.
4. Lewis, J. T., and R. Russell. 1997. An introduction to large deviation for teletraffic engineers. DIAS Technical Report DIAS-TP 97-16.
5. Kovalenko, I. N. 1980. *Analiz redkikh sobstviy pri otsenke effektivnosti i nadezhnosti sistem* [Rare event analysis in estimation of efficiency and reliability of systems]. Moscow: Sovetskoe radio. 239 p.
6. Borodina, A., K. Kalinina, and E. Morozov. 2014. On the accuracy of the effective bandwidth regenerative estimation. *Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT'14) Proceedings*. St. Petersburg: IEEE. 652–656.
7. Morozov, E., and K. Kalinina. 2015. On the effective bandwidth estimation in communication network. *29th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings*. 423–429.
8. Kalinina, K. 2015. Ob effektivnoy propusknoy sposobnosti uzlov kommunikatsionnoy seti [On the effective bandwidth of network nodes]. *Informatzionno-telekommunikacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie vysokotekhnologichnykh sistem: Mat-ly Vseross. konf. s mezhdunarodnym uchastiem* [Conference “Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of Highly Technological Systems” Proceedings]. Moscow: RUDN. 24–26.
9. Kalinina, K., E. Morozov, and V. Rykov. 2016. Effective bandwidth estimation in highly reliable regenerative networks. *2nd Symposium (International) on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management Proceedings*. Israel. 323–327.

10. Borodina, A. V., and E. V. Morozov. 2014. Otsenivanie effektivnoy propusknoy sposobnosti uzla v infokommunikatsionnoy tandemnoy seti [Effective bandwidth estimation in tandem network]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(2):37–54.
11. Chang, C.-S. 2000. *Performance guarantees in communication networks*. London: Springer-Verlag. 405 p.
12. Ganesh, A., N. O'Connell, and D. Wischik. 2004. *Big queues*. Lecture notes in mathematics ser. Springer. 260 p.
13. Asmussen, S., and P. Glynn. 2007. *Stochastic simulation: Algorithms and analysis*. Springer. 476 p.
14. Asmussen, S. 2003. *Applied probability and queues*. 2nd ed. Springer. 451 p.
15. Belyy, A., and E. Morozov. 2005. Quasi-regenerative and A-cycle queueing simulation. *Finnish Data Processing Week at the Petrozavodsk State University: Advances in Methods of Modern Information Technology Proceedings*. Petrozavodsk. 157–170.

Received May 11, 2017

Contributors

Kalinina Ksenia A. (b. 1990) — PhD student, Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 11 Pushkinskaya Str., Petrozavodsk 185910, Republic of Karelia, Russian Federation; kalininaksenia90@gmail.com

Morozov Evsei V. (b. 1947) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, leading scientist, Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 11 Pushkinskaya Str., Petrozavodsk 185910, Republic of Karelia, Russian Federation; professor, Petrozavodsk State University, 33 Lenin Pr., Petrozavodsk 185910, Republic of Karelia, Russian Federation; emorozov@karelia.ru

БАЙЕСОВСКАЯ РЕКУРРЕНТНАЯ МОДЕЛЬ РОСТА НАДЕЖНОСТИ: АПРИОРНЫЕ ПЛОТНОСТИ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО ВИДА*

A. A. Кудрявцев¹, С. И. Палионная²

Аннотация: Данная работа посвящена рассмотрению байесовской рекуррентной модели роста надежности сложных модифицируемых информационных систем. Предполагается, что основные параметры системы не являются заданными, а известны только их априорные распределения. Приводятся формулы для вычисления плотности и математического ожидания предельной надежности системы для случая, когда априорные плотности показателей «дефективности» и «эффективности» средства, исправляющего ошибки в системе, имеют вид полинома. В частности, рассматриваются равномерное и параболическое априорные распределения. Также приводятся соотношения для случая, когда один из параметров является вырожденным. Аналитические формулы иллюстрируются численными результатами для модельных примеров и графиками.

Ключевые слова: модифицируемые информационные системы; теория надежности; байесовский подход; параболическое распределение; равномерное распределение; полиномиальные плотности

DOI: 10.14357/08696527170404

1 Введение

Как правило, любая сложная информационная система не обладает необходимой надежностью. Чтобы улучшить надежность, систему подвергают различным модификациям, причем каждая модификация может как увеличить надежность, так и внести в систему новые дефекты. При этом современные информационные системы столь сложны, а их число столь велико, что проверять функциональность каждого агрегата путем детерминированных тестов представляется излишне дорогостоящим в смысле финансовых и временных затрат, поэтому, по всей видимости, единственным способом изучения надежностных показателей становится вероятностно-статистический.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 17-07-00577).

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, sofiapalionnaya@gmail.com

В предположении, что надежность системы остается постоянной между модификациями, рассмотрим рекуррентную модель изменения надежности, которая определяется следующим образом [1]:

$$\pi_{j+1} = \eta_{j+1}\pi_j + \theta_{j+1}(1 - \pi_j) .$$

Здесь $\{(\theta_j, \eta_j)\}$, $j \geq 1$, — последовательность независимых одинаково распределенных двумерных случайных векторов таких, что $0 < \eta_1 < 1$, $0 < \theta_1 < 1$ почти наверное. Начальная надежность π_0 считается заданной, случайные величины η_j (параметры «дефективности») и θ_j (параметры «эффективности») описывают соответственно возможное снижение и повышение надежности.

Обозначим $\lambda = 1 - E\theta_j$, $\mu = E\eta_j$. Можно показать [1], что при условии $\lambda + \mu \neq 1$

$$\pi = \lim_{j \rightarrow \infty} E\pi_j = \frac{\mu}{\lambda + \mu} .$$

Величина π характеризует асимптотическое значение надежности системы в рамках некоторой рекуррентной модели, задаваемой набором $\{(\theta_j, \eta_j)\}$.

В рамках байесовского подхода в постановке задач теории надежности [2] основные параметры системы λ и μ предполагаются случайными, а наиболее естественной и удобной для изучения характеристикой является усредненное значение предельной надежности

$$\pi_{\text{спед}} = E\pi = E\frac{\mu}{\lambda + \mu} ,$$

где усреднение ведется по совместному распределению случайных величин λ и μ .

Так как случайные величины η_1 и θ_1 удовлетворяют ограничениям $0 < \eta_1 < 1$ и $0 < \theta_1 < 1$, средние значения λ и μ величин $1 - E\theta_j$ и $E\eta_j$ соответственно также находятся на отрезке $[0, 1]$, поэтому в качестве априорных распределений параметров λ и μ следует выбирать только распределения, сосредоточенные на $[0, 1]$.

2 Основные результаты

Пусть λ и μ — независимые абсолютно непрерывные случайные величины, причем $P(\lambda \in [a_\lambda, b_\lambda]) = 1$, $0 < a_\lambda < b_\lambda$, и не существует множества $S \subset [a_\lambda, b_\lambda]$ положительной меры Лебега такого, что $P(\lambda \in S) = 0$, а для случайной величины μ выполнены аналогичные требования с параметрами a_μ и b_μ .

Отдельный интерес в классе распределений с компактным носителем (для которой случайной величины ξ) представляют распределения, плотности которых могут быть представлены в виде полинома:

$$f_\xi(x) = \sum_{i=0}^{n_\xi} c_{\xi,i} x^i \cdot \mathbf{1}(x \in [a_\xi, b_\xi]) . \quad (1)$$

К таким распределениям, в частности, относятся равномерное (при $n_\xi = 0$, $c_{\xi,0} = (b_\xi - a_\xi)^{-1}$) и параболическое (при $n_\xi = 2$) распределения. Для параболического распределения

$$c_{\xi,0} = -\frac{6a_\xi b_\xi}{(b_\xi - a_\xi)^3}; \quad c_{\xi,1} = \frac{6(a_\xi + b_\xi)}{(b_\xi - a_\xi)^3}; \quad c_{\xi,2} = -\frac{6}{(b_\xi - a_\xi)^3}. \quad (2)$$

В работах [3, 4] предложены формулы для вычисления функций распределения и плотностей величин $\rho = \lambda/\mu$ и $\pi = \mu/(\lambda + \mu)$ для априорных абсолютно непрерывных распределений с компактным носителем, а в работе [5] были получены плотность и математическое ожидание величины π в случае, когда априорные распределения являются параболическими. Скombинировав и обобщив полученные ранее результаты, легко получить выражения для вероятностных характеристик предельной надежности π для априорных плотностей вида (1).

Во всех последующих выкладках будем предполагать, что $x > 0$. Введем следующие обозначения. Пусть

$$L(a, b, x) = \sum_{i=0}^{n_\lambda} \sum_{j=0}^{n_\mu} c_{\lambda,i} c_{\mu,j} \frac{b^{i+j+2} - a^{i+j+2}}{i+j+2} \frac{(1-x)^i}{x^{i+2}}, \quad (3)$$

где a и b одновременно принадлежат отрезкам $[a_\mu, b_\mu]$ и $[a_\lambda/x, b_\lambda/x]$;

$$\begin{aligned} J_\xi(d, b) = & \sum_{i=0}^{n_\lambda} \sum_{j=0}^{n_\mu} c_{\lambda,i} c_{\mu,j} \times \\ & \times \sum_{k=0}^{l_\xi} C_{l_\xi}^k (-1)^k \left[\mathbf{1}(k \neq l_\xi) \frac{b^{k-l_\xi}}{k-l_\xi} + \mathbf{1}(k = l_\xi) \ln b \right] \frac{d^{i+j+2}}{i+j+2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $l_\xi = i \cdot \mathbf{1}(\xi = \lambda) + (j+1) \cdot \mathbf{1}(\xi = \mu)$.

Справедливо следующее утверждение.

Теорема 1. Пусть средний параметр «эффективности» λ и средний параметр «дефективности» μ независимы и имеют соответственно носители распределений $[a_\lambda, b_\lambda]$ и $[a_\mu, b_\mu]$, $0 < a_\lambda < b_\lambda \leq 1$, $0 < a_\mu < b_\mu \leq 1$, и плотности $f_\lambda(x)$ и $f_\mu(x)$ вида (1). Тогда предельная надежность $\pi = \mu/(\lambda + \mu)$ имеет плотность

$$\begin{aligned} f_\pi(x) = & \mathbf{1}\left(\frac{a_\mu}{b_\lambda + a_\mu} < x \leq \min\left\{\frac{a_\mu}{a_\lambda + a_\mu}, \frac{b_\mu}{b_\lambda + b_\mu}\right\}\right) L\left(a_\mu, \frac{x b_\lambda}{1-x}, x\right) + \\ & + \mathbf{1}\left(\frac{b_\mu}{b_\lambda + b_\mu} < x \leq \frac{a_\mu}{a_\lambda + a_\mu}\right) L(a_\mu, b_\mu, x) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \mathbf{1} \left(\frac{a_\mu}{a_\lambda + a_\mu} < x \leq \frac{b_\mu}{b_\lambda + b_\mu} \right) L \left(\frac{x a_\lambda}{1-x}, \frac{x b_\lambda}{1-x}, x \right) + \\
& + \mathbf{1} \left(\max \left\{ \frac{a_\mu}{a_\mu + a_\lambda}, \frac{b_\mu}{b_\mu + b_\lambda} \right\} < x \leq \frac{b_\mu}{a_\lambda + b_\mu} \right) L \left(\frac{x a_\lambda}{1-x}, b_\mu, x \right),
\end{aligned}$$

где величины $L(a, b, x)$ определены соотношением (3), и математическое ожидание

$$\begin{aligned}
\pi_{\text{сред}} = & J_\mu \left(b_\lambda, \frac{b_\lambda}{b_\lambda + a_\mu} \right) + J_\mu \left(a_\lambda, \frac{a_\lambda}{a_\lambda + b_\mu} \right) + J_\lambda \left(a_\mu, \frac{a_\mu}{b_\lambda + a_\mu} \right) + \\
& + J_\lambda \left(b_\mu, \frac{b_\mu}{a_\lambda + b_\mu} \right) - J_\lambda \left(a_\mu, \frac{a_\mu}{a_\lambda + a_\mu} \right) - J_\lambda \left(b_\mu, \frac{b_\mu}{b_\lambda + b_\mu} \right) - \\
& - J_\mu \left(b_\lambda, \frac{b_\lambda}{b_\lambda + b_\mu} \right) - J_\mu \left(a_\lambda, \frac{a_\lambda}{a_\lambda + a_\mu} \right),
\end{aligned}$$

где величины $J_\lambda(d, b)$ и $J_\mu(d, b)$ определены соотношением (4).

Замечание. Данная теорема обобщает полученные ранее результаты [5, 6] на случай общего полиномиального вида априорных плотностей.

Обозначим через R равномерное, а через P – параболическое распределение. Для удобства использования в приложениях приведем частные виды формулы (3), используемой для нахождения плотности $f_\pi(x)$, и формулы (4), используемой для нахождения средней предельной надежности $\pi_{\text{сред}}$, для комбинаций перечисленных распределений в виде табл. 1 и 2. Предполагается, что $\sum_{i=0}^{-1}(\cdot) = 0$. Нормировочные константы $c_{\xi,i}$ определены в (2).

Пользуясь изложенными в [5] методами, можно также получить результаты, аналогичные теореме 1, для случая, когда одно из априорных распределений

Таблица 1 Частный вид $L(a, b, x)$

λ	μ	$L(a, b, x)$
P	P	$\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 c_{\lambda,i} c_{\mu,j} \frac{b^{i+j+2} - a^{i+j+2}}{i+j+2} \frac{(1-x)^i}{x^{i+2}}$
P	R	$\sum_{i=0}^2 c_{\lambda,i} \frac{b^{i+2} - a^{i+2}}{(i+2)(b_\mu - a_\mu)} \frac{(1-x)^i}{x^{i+2}}$
R	P	$\sum_{j=0}^2 c_{\mu,j} \frac{b^{j+2} - a^{j+2}}{(j+2)(b_\lambda - a_\lambda)} \frac{1}{x^2}$
R	R	$\frac{b^2 - a^2}{2(b_\lambda - a_\lambda)(b_\mu - a_\mu)} \frac{1}{x^2}$

Таблица 2 Частный вид $J_\xi(d, b)$

λ	μ	$J_\xi(d, b)$
P	P	$\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 c_{\lambda,i} c_{\mu,j} \frac{d^{i+j+2}}{i+j+2} \left[\sum_{k=0}^{l_\xi-1} C_{l_\xi}^k (-1)^k \frac{b^{k-l_\xi}}{k-l_\xi} + (-1)^{l_\xi} \ln b \right],$ $l_\lambda = i, l_\mu = j+1$
P	R	$\sum_{i=0}^2 \frac{\mathbf{1}(\xi = \lambda) c_{\lambda,i} d^{i+2}}{(i+2)(b_\mu - a_\mu)} \left[\sum_{k=0}^{i-1} C_i^k (-1)^k \frac{b^{k-i}}{k-i} + (-1)^i \ln b \right] -$ $- \sum_{i=0}^2 \frac{\mathbf{1}(\xi = \mu) c_{\lambda,i} d^{i+2} (1/b + \ln b)}{(i+2)(b_\mu - a_\mu)}$
R	P	$\sum_{j=0}^2 \frac{\mathbf{1}(\xi = \lambda) c_{\mu,j} d^{j+2} \ln b}{(j+2)(b_\lambda - a_\lambda)} +$ $+ \sum_{j=0}^2 \frac{\mathbf{1}(\xi = \mu) c_{\mu,j} d^{j+2}}{(j+2)(b_\lambda - a_\lambda)} \left[\sum_{k=0}^j C_{j+1}^k (-1)^k \frac{b^{k-j-1}}{k-j-1} + (-1)^{j+1} \ln b \right]$
R	R	$\frac{\mathbf{1}(\xi = \lambda) d^2 \ln b}{2(b_\lambda - a_\lambda)(b_\mu - a_\mu)} - \frac{\mathbf{1}(\xi = \mu) d^2 (1/b + \ln b)}{2(b_\lambda - a_\lambda)(b_\mu - a_\mu)}$

является вырожденным, что, по сути, соответствует постановке задачи, при которой концы отрезка, носителя распределения, стягиваются в одну точку.

Справедливы следующие утверждения.

Теорема 2. Пусть средний параметр «эффективности» λ имеет вырожденное распределение, а средний параметр «дефективности» μ имеет плотность полиномиального вида (1) с параметрами $0 \leq a_\mu < b_\mu \leq 1$. Тогда плотность и среднее предельной надежности $\pi = \mu/(\lambda + \mu)$ имеют вид:

$$f_\pi(x) = \sum_{j=0}^{n_\mu} \frac{c_{\mu,j} \lambda^{j+1} x^j}{(1-x)^{j+2}};$$

$$\pi_{\text{сред}} = \sum_{j=0}^{n_\mu} c_{\mu,j} \lambda^{j+1} \left[\sum_{k=0}^j C_{j+1}^k (-1)^k \frac{(1+a_\mu)^{j-k+1} - (1+b_\mu)^{j-k+1}}{k-j-1} + (-1)^{j+1} \ln \frac{1+b_\mu}{1+a_\mu} \right].$$

Теорема 3. Пусть средний параметр «эффективности» λ имеет плотность полиномиального вида (1) с параметрами $0 \leq a_\lambda < b_\lambda \leq 1$, а средний параметр

«дефективности» μ имеет вырожденное распределение. Тогда плотность и среднее предельной надежности $\pi = \mu/(\lambda + \mu)$ имеют вид:

$$f_\pi(x) = \sum_{i=0}^{n_\lambda} c_{\lambda,i} \mu^{i+1} \frac{(1-x)^i}{x^{i+2}};$$

$$\pi_{\text{сред}} = \sum_{i=0}^{n_\lambda} c_{\lambda,i} \mu^{i+1} \left[\sum_{k=0}^{i-1} C_i^k (-1)^k \frac{(1+a_\lambda)^{i-k} - (1+b_\lambda)^{i-k}}{k-i} + (-1)^i \ln \frac{1+b_\lambda}{1+a_\lambda} \right].$$

3 Численные результаты

В статье [7] был описан программный комплекс, разработанный для вычисления различных вероятностных характеристик байесовских систем массового

Таблица 3 Частные значения $\pi_{\text{сред}}$ ($\lambda \sim P(a_\lambda, b_\lambda)$, $\mu \sim R(a_\mu, b_\mu)$)

$a_\lambda; b_\lambda$	$a_\mu; b_\mu$									
	0,0; 1	0,1; 1	0,2; 1	0,3; 1	0,4; 1	0,5; 1	0,6; 1	0,7; 1	0,8; 1	0,9; 1
0,0; 1	0,48	0,52	0,55	0,58	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,67
0,1; 1	0,45	0,49	0,52	0,54	0,57	0,59	0,60	0,62	0,63	0,65
0,2; 1	0,42	0,46	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58	0,59	0,61	0,62
0,3; 1	0,40	0,44	0,47	0,49	0,52	0,54	0,56	0,57	0,59	0,60
0,4; 1	0,38	0,42	0,45	0,47	0,50	0,52	0,53	0,55	0,57	0,58
0,5; 1	0,37	0,40	0,43	0,46	0,48	0,50	0,52	0,53	0,55	0,56
0,6; 1	0,35	0,39	0,41	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,53	0,54
0,7; 1	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,47	0,48	0,50	0,51	0,53
0,8; 1	0,33	0,36	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,48	0,50	0,51
0,9; 1	0,32	0,35	0,37	0,40	0,42	0,44	0,45	0,47	0,49	0,50

Таблица 4 Частные значения $\pi_{\text{сред}}$ ($\lambda \sim R(a_\lambda, b_\lambda)$, $\mu \sim P(a_\mu, b_\mu)$)

$a_\lambda; b_\lambda$	$a_\mu; b_\mu$									
	0; 0,1	0; 0,2	0; 0,3	0; 0,4	0; 0,5	0; 0,6	0; 0,7	0; 0,8	0; 0,9	0; 1,0
0; 0,1	0,52	0,66	0,73	0,78	0,81	0,83	0,85	0,87	0,88	0,89
0; 0,2	0,38	0,52	0,60	0,66	0,70	0,73	0,76	0,78	0,80	0,81
0; 0,3	0,31	0,44	0,52	0,58	0,63	0,66	0,69	0,71	0,73	0,75
0; 0,4	0,26	0,38	0,46	0,52	0,57	0,60	0,64	0,66	0,68	0,70
0; 0,5	0,23	0,34	0,42	0,48	0,52	0,56	0,59	0,62	0,64	0,66
0; 0,6	0,21	0,31	0,38	0,44	0,49	0,52	0,55	0,58	0,60	0,63
0; 0,7	0,19	0,28	0,36	0,41	0,45	0,49	0,52	0,55	0,57	0,60
0; 0,8	0,17	0,26	0,33	0,38	0,43	0,46	0,50	0,52	0,55	0,57
0; 0,9	0,16	0,25	0,31	0,36	0,40	0,44	0,47	0,50	0,52	0,54
0; 1,0	0,15	0,23	0,29	0,34	0,38	0,42	0,45	0,48	0,50	0,52

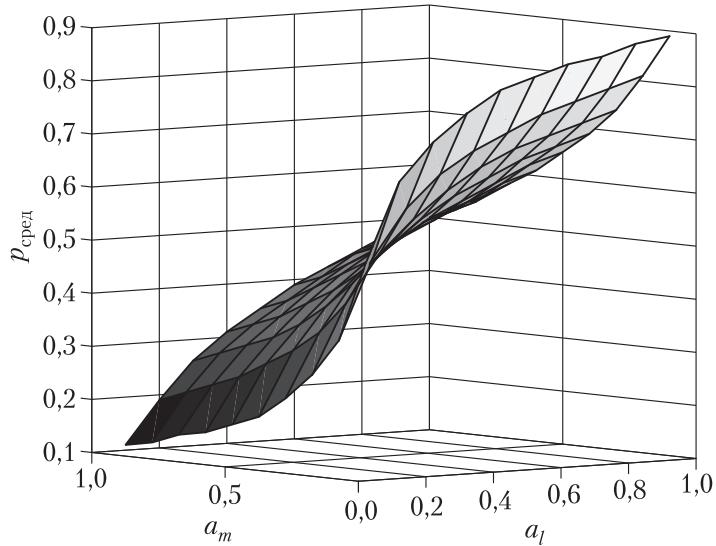


Рис. 1 Визуализация значений $\pi_{\text{сред}}$ ($\lambda \sim P(a_\lambda, b_\lambda)$, $\mu \sim R(a_\mu, b_\mu)$) (см. табл. 3)

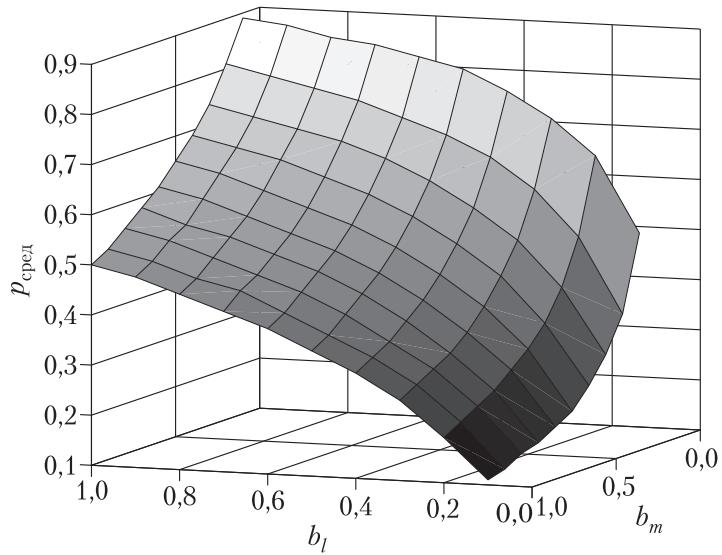


Рис. 2 Визуализация значений $\pi_{\text{сред}}$ ($\lambda \sim R(a_\lambda, b_\lambda)$, $\mu \sim P(a_\mu, b_\mu)$) (см. табл. 4)

обслуживания и надежности. Один из модулей этого комплекса предназначен для вычисления усредненной предельной надежности для различных априорных распределений параметров «эффективности» и «дефективности». Аналитические результаты, описанные в предыдущем разделе, позволили дополнить функциональные возможности этого модуля. Приведем ряд таблиц (табл. 3 и 4) с численными результатами (с точностью до сотых) для некоторых априорных распределений.

Полученные численные результаты позволяют анализировать изменение надежности системы в зависимости от значений параметров априорных распределений, в том числе и при помощи графиков. На рис. 1 и 2 изображены поверхности, соответствующие значениям усредненной предельной надежности, приведенным в табл. 3 и 4 соответственно.

Литература

1. Королев В. Ю., Соколов И. А. Основы математической теории надежности модифицируемых систем. — М.: ИПИ РАН, 2006. 102 с.
2. Кудрявцев А. А., Шоргин С. Я. Байесовские модели в теории массового обслуживания и надежности. — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2015. 76 с.
3. Кудрявцев А. А. Байесовские модели массового обслуживания и надежности: априорные распределения с компактным носителем // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 1. С. 67–71.
4. Кудрявцев А. А. Зависимые от коэффициента баланса характеристики в байесовских моделях с компактным носителем априорных распределений // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 77–80.
5. Кудрявцев А. А., Палионная С. И. Байесовская рекуррентная модель роста надежности: параболическое распределение параметров // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 2. С. 80–83.
6. Кудрявцев А. А., Соколов И. А., Шоргин С. Я. Байесовская рекуррентная модель роста надежности: равномерное распределение параметров // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 2. С. 55–59.
7. Кудрявцев А. А. Программный комплекс анализа байесовских моделей в теории массового обслуживания и надежности // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. Вып. 3. С. 251–261.

Поступила в редакцию 12.06.17

BAYESIAN RECURRENT MODEL OF RELIABILITY GROWTH: *A PRIORI* DENSITIES OF POLYNOMIAL TYPE

A. A. Kudryavtsev and S. I. Palionnaia

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

Abstract: This work is devoted to the Bayesian recurrent model of reliability growth of complex modifiable information systems. It is assumed that the key parameters of the system are unknown but the researcher obtains the information about their *a priori* distributions. The paper contains formulas for density and mean of marginal system's reliability when indexes of "defectiveness" and "efficiency" of the tool correcting the deficiencies in the system have *a priori* distributions with polynomial densities. For instance, uniform and parabolic distributions are considered. Likewise, the results for the case of degenerate distribution of one of the parameters are provided. The obtained formulas are illustrated with numerical results and plots.

Keywords: modifiable information systems; reliability theory; Bayesian approach; parabolic distribution; uniform distribution; polynomial densities

DOI: 10.14357/08696527170404

Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 17-07-00577).

References

1. Korolev, V. Yu., and I. A. Sokolov. 2006. *Osnovy matematicheskoy teorii nadezhnosti modifitsiruemых sistem* [Fundamentals of mathematical theory of modified systems reliability]. Moscow: IPI RAN. 102 p.
2. Kudryavtsev, A. A., and S. Ya. Shorgin. 2015. *Bayesovskie modeli v teorii massovogo obsluzhivaniya i nadezhnosti* [Bayesian models in mass service and reliability theories]. Moscow: FRC CSC RAS. 76 p.
3. Kudryavtsev, A. A. 2016. Bayesovskie modeli massovogo obsluzhivaniya i nadezhnosti: apriornye raspredeleniya s kompaktnym nositelem [Bayesian queueing and reliability models: *A priori* distributions with compact support]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(1):67–71.
4. Kudryavtsev, A. A. 2016. Zavisimye ot koeffitsienta balansa kharakteristiki v bayesovskikh modelyakh s kompaktnym nositelem apriornykh raspredeleniy [Characteristics dependent on the balance coefficient in Bayesian models with compact support of *a priori* distributions]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(3):77–80.

5. Kudryavtsev, A. A., and S. I. Palionnaia. 2016. Bayesovskaya rekurrentnaya model' rosta nadezhnosti: parabolicheskoe raspredelenie parametrov [Bayesian recurrent model of reliability growth: Parabolic distribution of parameters]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(2):80–83.
6. Kudryavtsev, A. A., I. A. Sokolov, and S. Ya. Shorgin. 2013. Bayesovskaya rekurrentnaya model' rosta nadezhnosti: ravnomernoe raspredelenie parametrov [Bayesian recurrent model of reliability growth: Uniform distribution of parameters]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):55–59.
7. Kudryavtsev, A. A. 2015. Programmnyy kompleks analiza bayesovskikh modeley v teorii massovogo obsluzhivaniya i nadezhnosti [Software complex for analysis of Bayesian models in queueing and reliability theories]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):251–261.

Received June 12, 2017

Contributors

Kudryavtsev Alexey A. (b. 1978) — Candidate of Sciences (PhD) 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

Palionnaia Sofia I. (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; sofiapalionnaya@gmail.com

СТРАТЕГИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОРЕСУРСОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ С ТРАФИКОМ NARROW-BAND IoT*

B. O. Бегищев¹, A. K. Самуйлов², D. A. Молчанов³, K. E. Самуйлов⁴

Аннотация: Быстрый рост как объемов, так и количества типов данных, которые должны поддерживаться в будущих приложениях Интернета вещей (Internet of Things, IoT) является одной из ключевых особенностей эволюции мобильных сетей связи от 4G+ к 5G. В этой связи поставщикам услуг IoT необходимо обеспечивать массовые передачи мультимедийных данных совместно с сообщениями машинного типа. Необходимость одновременной поддержки нескольких категорий трафика влечет неоднородность сетей 5G. Для подобного случая предложен режим внутриполосного развертывания технологии Narrow-Band IoT (NB-IoT), стандартизированной 3GPP. В работе представлены возможные стратегии совместного использования ресурсов мультимедийными данными и данными, полученными от сенсоров, в гибридной беспроводной сети LTE/NB-IoT. В рамках разработанной методологии проведено сравнение стратегий и даны рекомендации по выбору оптимальной стратегии.

Ключевые слова: Интернет вещей; NB-IoT (Narrowband IoT); LTE (Long Term Evolution); аналитическая модель; стратегии распределения ресурсов

DOI: 10.14357/08696527170405

1 Введение

В истории развития информатики объем передаваемых данных постоянно увеличивался: от 1 ПБ в 1996 г. до 1 ЭБ в 2000 г. и 1 ЗБ в 2016 г. [1]. Следуя этой эволюции, решения по автоматизированной обработке данных значительно улучшились: вычислительные машины прошлых лет превратились в интеллектуальные системы обработки информации для различных областей деятельности человека [2, 3]. Возможность обрабатывать большие объемы неструктурированных, разнотипных и быстро изменяющихся данных на сегодняшний день

* Работа выполнена при поддержке Программы РУДН «5-100», Минобрнауки России (соглашение 02.a03.21.0008) и РФФИ (проекты 16-07-00766 и 17-07-00845).

¹ Российский университет дружбы народов, begishev_vo@rudn.university

² Российский университет дружбы народов, samuylov_ak@rudn.university

³ Российский университет дружбы народов, molchanov_da@rudn.university

⁴ Российский университет дружбы народов, Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, samuylov_ke@rudn.university

позволяет считать интеллектуальные системы важным компонентом в отрасли информационно-коммуникационных технологий.

В соответствии с развитием методов обработки больших данных значительно улучшились технологии сбора информации из распределенных источников. Начиная с низкоуровневых систем для проводных сенсорных сетей, технологии превратились в широкомасштабные стандартизированные беспроводные сети для разных категорий датчиков. Наиболее успешными примерами систем, предназначенных для передачи данных с низкими объемами, являются GSM, LTE-M, LoRaWAN, SIGFOX, GPRS/EDGE, а также недавно разработанный 3GPP стандарт беспроводной узкополосной сети — NB-IoT [4]. Последние три из перечисленных технологий характеризуются диапазонами охвата в десятки километров, высокой энергоэффективностью и низкой стоимостью оборудования. Эти свойства позволяют считать их основными кандидатами для технологии сбора больших данных (Big Data) в отрасли Интернета вещей [5–7].

Внедрение интеллектуальных устройств, таких как системы видеонаблюдения [8, 9], предъявляют принципиально новые требования к системам сбора и доставки информации. Существующие коммуникационные решения для межмашинных взаимодействий не применимы в этих сценариях из-за большой емкости потоковой передачи видео. Таким образом, применение высокоскоростных (сотовых) беспроводных решений для передачи данных на большие расстояния становится единственным возможным вариантом.

Комбинация двух или более гетерогенных сетей увеличивает интеллектуальность и надежность систем принятия решений [10]. Например, сигнал об обнаружении чрезвычайных ситуаций, сообщаемый группой интеллектуальных счетчиков, может быть сразу проверен через визуальный канал. Кроме того, в комбинации таких гетерогенных сетей используется ряд задач, в которых надежность доставки потоков данных играет ключевую роль [11]. Учитывая ограниченный объем радиоресурсов, выбор стратегии распределения радиоресурсов между меньшим числом высокоскоростных видеокамер [12] и большим количеством низкоскоростных смарт-счетчиков [13] является важной задачей для операторов беспроводных сетей. В рамках этой задачи необходимо сбалансировать вероятностно-временные характеристики (BBX), такие как вероятности потери сеанса для отдельных потоков данных.

В данной статье разработана аналитическая модель для исследования BBX обработки трафика NB-IoT при наличии конкурирующего трафика LTE. Используя разработанный инструмент, авторы сравнивают три возможные стратегии распределения радиоресурсов: статическую, динамическую и динамическую с резервированием. В качестве эталонной модели рассматривается внутриполосный режим, представленный в LTE Rel. 13 [14–16], где радиостанция LTE разделяет спектр частот с технологией NB-IoT. Эта комбинация была выбрана в силу того, что (1) LTE и NB-IoT — единственные два решения, которые используют один и тот же спектр частот; (2) эта комбинация получает наибольшую поддержку со стороны отрасли Интернета вещей и, как ожидается,

станет основным стандартом для сбора больших данных в мире Интернета вещей.

В разд. 2 описывается системная модель соты беспроводной сети, одновременно обслуживающей NB-IoT и видеотрафик. Предложенная модель производительности формализована в разд. 3. Численный анализ представлен в разд. 4. Выводы приводятся в разд. 5.

2 Системная модель

В этом разделе вводится понятие оператора, реализующего службу наблюдения, используя возможности технологий LTE и NB-IoT. Далее формализуется модель LTE-соты с поддержкой технологии NB-IoT и вводятся стратегии распределения ресурсов.

Рассмотрим «оператора», который управляет системой зонального наблюдения. Система представляет собой гибридное решение, состоящее из (1) некоторого числа видеокамер для проведения видеомониторинга; (2) многочисленных датчиков для обнаружения вторжений, пожаров, а также для контроля температуры и давления воздуха; (3) системы обработки больших объемов данных, получаемых как с видеокамер, так и со смарт-датчиков.

Поскольку проводное и Wi-Fi соединения не всегда доступны в районах наблюдения, передача трафика от камер наблюдения производится при помощи сотовой сети LTE. Предполагается, что смарт-датчики подключены по NB-IoT, которая является одной из наиболее перспективных технологий IoT-отрасли. Такая комбинация решений может эффективно существовать в рамках одной сети. Поскольку оба решения работают на лицензированных частотах, поставщик услуг, ориентированный на надежность связи, будет приобретать определенный частотный ресурс у оператора сети через механизм «сетевого среза» [17]. Такой подход может обеспечить бесперебойное обслуживание независимо от того, в каком состоянии находятся оставшиеся частотные полосы оператора.

Сценарий развертывания, описанный выше, предполагает совместное использование предоставленных ресурсов LTE между двумя типами конечных узлов: камерами наблюдения и датчиками NB-IoT, поднимая вопрос об эффективном распределении ресурсов. В этой связи характеристики надежности обоих потоков трафика приобретают первостепенное значение, поскольку сервер обработки не сможет принимать обоснованные решения, если часть потока станет временно недоступна. Одним из возможных примеров может служить система обнаружения пожара, которая развернута в определенных зонах, где любое ложное предупреждение является чрезвычайно дорогостоящим (например, для фабрики). Таким образом, если блок обработки получает предупреждение о пожаре от датчиков дыма/температуры, он сначала перекрестно проверяет его с помощью визуального канала (видеопоток от ближайшей камеры) и только затем передает сигнал аварийной эвакуации.

Для решения вышеперечисленных вопросов подробно рассмотрим модель системы, а затем приступим к формализации стратегий распределения ресурсов.

2.1 Модель LTE-сотов с поддержкой технологии Narrow-Band IoT

Рассмотрим сотову сети LTE с базовой станцией, расположенной в центре сотовы. Напомним, что радиус покрытия ячейки для услуг LTE, R_L , намного меньше по сравнению с покрытием технологии NB-IoT, R_N . Весь набор доступных ресурсов будем измерять в каналах NB-IoT. В дальнейшем будем называть это базовым каналом. В направлении восходящей линии для NB-IoT доступны C каналов, которые можно вычислить как $C = cS$, где S — число ресурсных блоков (RB); c — число базовых каналов в одном RB [18].

Входящий поток от сессий LTE является пуассоновским с интенсивностью ν . Время предоставления LTE-услуги распределено по экспоненциальному закону со средним $1/\mu$, а минимальный объем ресурсов, запрошенных на установление соединения на каждом временному интервале восходящей линии, составляет d базовых каналов. Пусть $a = \nu/\mu$ — предложенная нагрузка LTE. Запросы на соединение от NB-IoT поступают в соответствии с процессом Пуассона с интенсивностью λ . Каждое поступление данных характеризуется экспоненциально распределенным временем обслуживания с параметром θ . Для каждого сеанса NB-IoT требуется b базовых каналов. Интенсивность предложенной нагрузки на передачу блоков данных от NB-IoT обозначим через $\rho = \lambda\theta$. Аналогично сессиям LTE, устройства NB-IoT считаются статичными в течение всей сессии.

2.2 Стратегии распределения ресурсов

Рассматриваемые стратегии распределения ресурсов между камерами LTE и измерительными датчиками NB-IoT показаны на рис. 1. Отметим, что максимальное число базовых каналов, которые могут быть выделены для NB-IoT и LTE, составляет $C_N = C - R_L$ и $C_L = C - R_N$ соответственно, где R_L и R_N — минимальное число каналов, которые всегда доступны и зарезервированы для трафика LTE и NB-IoT соответственно. Таким образом, в работе представлено сравнение следующих трех стратегий распределения ресурсов:

- (1) *статическая стратегия (STAT)*. Эта стратегия соответствует случаю, когда минимальное и максимальное число базовых каналов, выделенных для NB-IoT и LTE, совпадают: $R_L = C_L$, $R_N = C_N$. Другими словами, все ресурсы строго разделены между NB-IoT и LTE;
- (2) *динамическая стратегия (DYN)*. В этом случае минимальный объем ресурсов не назначается NB-IoT и LTE, т. е. $R_L = R_N = 0$. Однако максимальный объем ресурсов и $C_L = C_R = C$ полностью разделены между NB-IoT и LTE;
- (3) *динамическая стратегия с резервированием (DYNRES)*. В этой стратегии максимальные распределения ресурсов, доступные для NB-IoT и LTE,

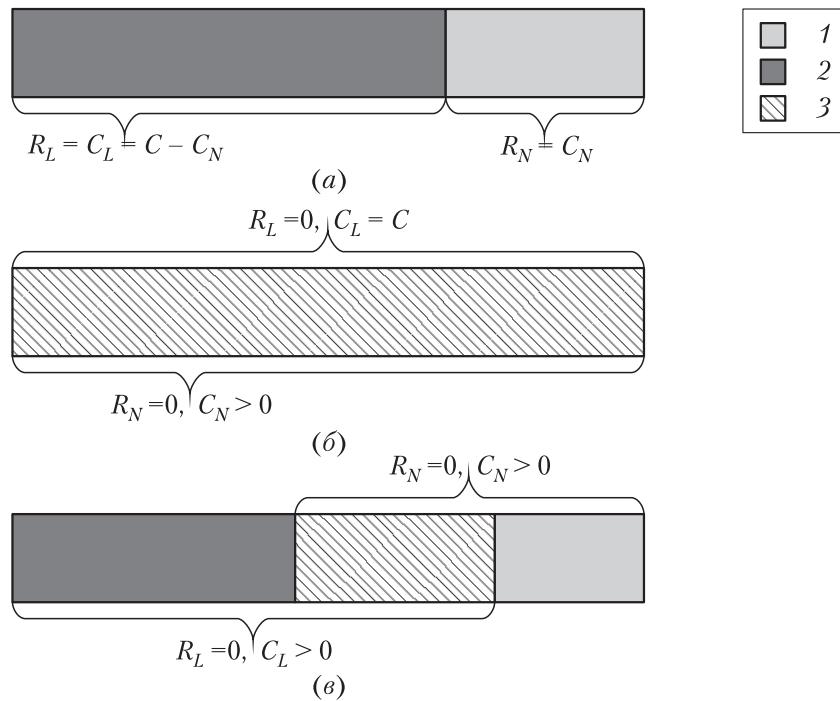


Рис. 1 Предлагаемые стратегии распределения ресурсов: (a) STAT; (б) DYN; (в) DYNRES; 1 — NB-IoT; 2 — LTE; 3 — NB-IoT + LTE

определенены так, что $C_N = C - R_L > 0$ и $C_L = C - R_N$. При этом $R_N > 0$ и $R_L > 0$ определяют минимальный объем ресурсов, предназначенные для NB-IoT и LTE соответственно. Остальные ресурсы динамически распределяются между двумя типами трафика.

Уникальной особенностью рассматриваемой системы с двумя разнотипными входящими потоками является тот факт, что базовые каналы будут последовательно выделяться с учетом особенностей внутриполосной технологии NB-IoT [19].

Процесс управления ресурсами показан на рис. 2.

Рассмотрим систему без активных сессий и предположим, что поступает новая сессия от NB-IoT. В этом случае RB становится доступным для NB-IoT, где каждый запрос на принятие данных требует ровно b базовых каналов NB-IoT. Таким образом, новая сессия NB-IoT занимает базовые каналы в этом RB. Если при следующем установлении сессии NB-IoT все каналы в данном RB будут уже заняты, то будет выделен следующий RB, доступный для услуг NB-IoT.

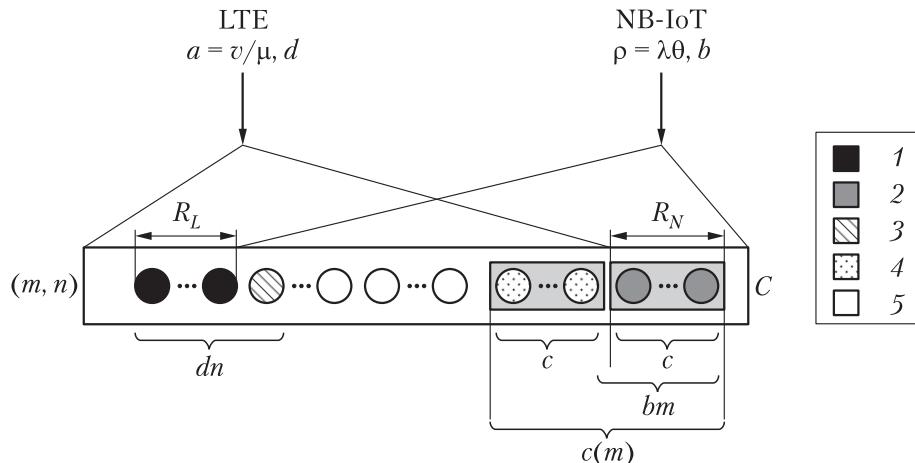


Рис. 2 Схема последовательного распределения ресурсов соты сети LTE: 1 — зарезервированные ресурсы для LTE; 2 — зарезервированные ресурсы для NB-IoT; 3 — ресурсы, используемые LTE; 4 — ресурсы, используемые NB-IoT; 5 — свободные ресурсы для LTE и NB-IoT

3 Модель оценки показателей производительности

Система, описанная в разд. 2, может быть представлена в виде системы массового обслуживания с двумя входящими потоками, имеющими разные дисциплины обслуживания с выделением ресурсных блоков. Отметим, что система позволяет управлять потерями сессий как NB-IoT, так и LTE. Основное отличие модели, представленной ниже, заключается в комплексной последовательной стратегии распределения ресурсов на основе блоков.

Определим состояние системы. Отметим, что запрос на обслуживание от LTE принимается, если в момент его поступления доступно не менее d из $C_L = C - R_N$ каналов, таким образом уменьшается число доступных базовых каналов на величину d и число RB на $\lceil d/c \rceil$. Количество сессий LTE $\lceil d/c \rceil$ всегда является целым числом $\lceil d/c \rceil \geq 1$. Если при принятии запросов на соединение от NB-IoT число базовых каналов в текущем RB выше, чем b , то сессия NB-IoT принимается в этом RB. Если число доступных базовых каналов ниже, чем b , и новый RB доступен для трафика NB-IoT, то этот RB принимает на обслуживание поступивший запрос от NB-IoT, тем самым уменьшая число базовых каналов в этом RB на b . В других случаях сессия NB-IoT теряется.

Пусть $m(t)$ и $n(t)$, $t > 0$, определяют число активных сессий NB-IoT и LTE соответственно. Следовательно, состояние системы соты сети LTE, обслуживающей трафик NB-IoT и LTE, может быть описано двумерным случайным процессом $\{m(t), n(t), t > 0\}$ со следующим пространством состояний:

$\mathcal{X} = \{m \geq 0, n \geq 0 : nd \leq C - R_N, c(m) \leq C - R_L, nd + c(m) \leq C\}$,
где $c(m) = c\lceil bm/M \rceil$ — число базовых каналов, занятых сессиями NB-IoT; $M = \lceil c/b \rceil$ — максимальное число сессий в NB-IoT, которые могут быть обслужены в одном RB.

Заметим, что $\{m(t), n(t), t > 0\}$ является марковским процессом. Введем $p(m, n)(t)$, $\{m, n\} \in \mathcal{X}$, — стационарное распределение вероятностей m сессий NB-IoT и n сессий LTE в системе в момент времени t :

$$p(m, n) = \lim_{t \rightarrow \infty} p(m, n)(t), \quad \{m, n\} \in \mathcal{X}.$$

Чтобы получить уравнение локального баланса, рассмотрим произвольный контур в диаграмме перехода состояний. Стационарное распределение вероятностей случайного процесса $\{m(t), n(t), t > 0\}$ удовлетворяет следующим уравнениям локального баланса:

$$\begin{aligned} p(m, n) \frac{c(m)}{\theta} &= p(m-1, n)\lambda, \quad m > 0, \quad (m, n) \in \mathcal{X}; \\ p(m, n)\mu n &= p(m, n-1)\nu, \quad n > 0, \quad (m, n) \in \mathcal{X}, \end{aligned}$$

и представляется следующим выражением:

$$p(m, n) = G^{-1}(\mathcal{X}) \left(\frac{\rho}{Mb} \right)^m \left(\prod_{i=1}^m \left\lceil \frac{i}{M} \right\rceil \right)^{-1} \frac{a^n}{n!}, \quad (1)$$

где константа $G(\mathcal{X})$ имеет следующий вид:

$$G(\mathcal{X}) = \sum_{(m,n) \in \mathcal{X}} \frac{\rho}{Mb} \left(\prod_{i=1}^m \left\lceil \frac{i}{M} \right\rceil \right)^{-1} \frac{a^n}{n!}. \quad (2)$$

3.1 Характеристики обслуживания

Получение формул вероятностей блокировок сессий является трудоемким вычислительным процессом, так как пространство состояний системы довольно велико и число состояний может достигать нескольких десятков тысяч. Чтобы снять это ограничение, был разработан специальный численный алгоритм, основанный на рекуррентной связи между ненормированными вероятностями макросостояний, который кратко описан ниже.

Определим разбиение пространства состояний \mathcal{X}

$$\mathcal{X} = \bigcup_{s=0}^S \mathcal{X}_s, \quad (3)$$

где $\mathcal{X}_s = \{(m, n) \in \mathcal{X} : c(m) = sc\}$.

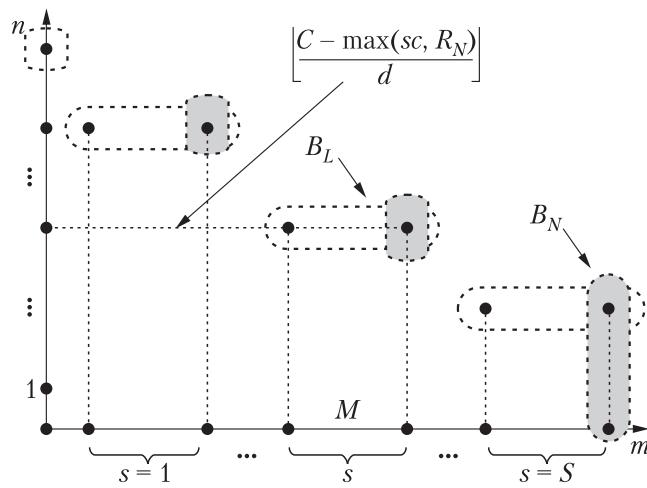


Рис. 3 Разбиение пространства \mathcal{X} на макросостояния

Разбиение пространства состояний на макросостояния показано на рис. 3. Здесь также иллюстрируются подпространства, соответствующие состояниям блокировки сессий LTE и NB-IoT. Зная стационарное распределение состояний системы, представленное в (1) и (2) и действующее над (3), искомые вероятности блокировок можно легко вывести. В частности, используя (3), получим вероятность блокировки сессий LTE:

$$p_L = p\left(0, \left\lfloor \frac{C - R_N}{d} \right\rfloor\right) + \sum_{s=1}^{\lfloor (C-R_L)/c \rfloor} \sum_{m=[s-1]M+1}^{sM} p\left(m, \left\lfloor \frac{C - \max[sc, R_N]}{d} \right\rfloor\right).$$

Аналогичные вычисления проводятся для подмножества блокировок сессий NB-IoT, что в конечном итоге дает выражение для вычисления вероятности блокировок сессий NB-IoT в следующем виде:

$$p_N = \sum_{n=0}^{\lfloor R_L/d \rfloor} p\left(\left\lfloor \frac{C - R_L}{c} \right\rfloor M, n\right) + \sum_{s=\lfloor R_N/c \rfloor}^{\lfloor (C-R_L)/c \rfloor - 1} \sum_{n=\lfloor (C-(s+1)c)/d \rfloor + 1}^{\lfloor (C-\max(sc, R_N))/d \rfloor} p(sM, n).$$

Средняя длительность сессии принимает вид:

$$E[T_N] = \frac{\sum_{m=0}^{\lfloor (C-R_L)/b \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor (C-\max(\lceil m/M \rceil c, R_N))/d \rfloor} \lceil m/M \rceil p(m, n)}{\lambda (1 - p_N)}.$$

Среднее число базовых каналов, занятых одной сессией NB-IoT, имеет вид:

$$E[b_N] = M \sum_{m=0}^{\lfloor (C-R_L)/b \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor (C-\max(\lceil m/M \rceil c, R_N))/d \rfloor} \left\lceil \frac{m}{M} \right\rceil p(m, n).$$

Среднее число каналов, занятых сессиями LTE, равно:

$$E[b_L] = d \sum_{m=0}^{\lfloor (C-R_L)/b \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor (C-\max(\lceil m/M \rceil c, R_N))/d \rfloor} n p(m, n).$$

Среднее число базовых каналов, занятых обоими типами трафика, определяется через $E[b_{NL}] = E[b_N] + E[b_L]$.

4 Численный анализ

Для получения количественной и качественной оценки поведения рассматриваемой системы в данном разделе проводится численный анализ предложенных стратегий распределения ресурсов. Входные параметры для численного анализа представлены в таблице.

Рассматривается рис. 4, иллюстрирующий значения вероятности блокировки сессии LTE в зависимости от общего числа подключенных датчиков NB-IoT при выбранном статическом распределении ресурсов STAT, в котором общий объем радиоресурсов строго разделен между двумя типами трафика. Для этой стратегии вводится коэффициент разделения ресурсов γ , который характеризует объем ресурсов, зарезервированных для NB-IoT. Заметим, что вследствие жесткого разделения ресурсов между LTE и NB-IoT характеристики стратегии STAT зависят только от выбранного значения γ . Причиной этому является то, что

Параметры системы для численного анализа

Параметр	Описание	Значение
C	Число базовых каналов в соте LTE	100
c	Число базовых каналов в RB	4
R_N	Число каналов для NB-IoT	$[0, \dots, 100]$
R_L	Число каналов для LTE	$[0, \dots, 100]$
b	Число каналов для сессий NB-IoT	1
d	Число каналов для LTE-сессий	4
θ	Средняя скорость сессий NB-IoT	100 кбит
$1/\mu$	Средняя продолжительность LTE-сессий	10 с
λ	Интенсивность входящего потока NB-IoT	10/мин
ν	Интенсивность входящего потока LTE	1/мин

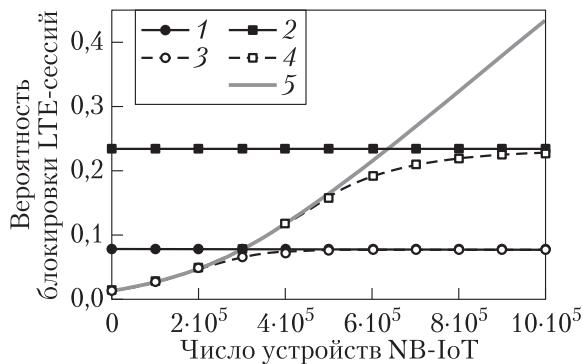


Рис. 4 Вероятность блокировки LTE в зависимости от предложенной нагрузки NB-IoT:
1 — STAT, $B = 0.8$; 2 — STAT, $B = 0.6$; 3 — DYNRES, $R_L = 0.8$; 4 — DYNRES, $R_L = 0.6$; 5 — DYN

стратегия STAT создает две независимые виртуальные беспроводные системы: одну для LTE, другую для NB-IoT. Хотя эта стратегия является самой простой с точки зрения ее реализации, ее можно рекомендовать только для таких систем, где средняя нагрузка от всех параллельно выполняемых услуг (1) редко изменяется во времени, (2) известна заранее или (3) может быть хорошо предвидена. Подобное поведение системы редко наблюдается на практике.

Значения вероятности блокировки в стратегии DYN, где общий объем ресурсов доступен для обоих трафиков, сильно зависят от текущей нагрузки из сегмента NB-IoT. Для меньших значений числа подключенных устройств NB-IoT стратегия DYN превосходит STAT, так как позволяет всю полосу частот переключить в режим доступности для LTE-устройств в отсутствие трафика NB-IoT. Рост трафика NB-IoT сопровождается увеличением значений вероятности блокировки для стратегии DYN, поскольку трафик NB-IoT начинает конкурировать за ресурсы с постоянной нагрузкой, исходящей от трафика LTE. Наконец, с поступлением большого числа устройств NB-IoT трафик начинает доминировать в общем диапазоне. В итоге вероятность блокировки будет выше, чем в стратегии STAT, независимо от выбранного значения коэффициента распределения ресурсов. Стратегия распределения ресурсов DYN может быть рекомендована для систем, где средние нагрузки, требуемые каждым потоком (измеренные в Гц/с), сопоставимы. В то же время стратегия DYN остается адекватным решением для нестабильных систем, где нагрузка может сильно изменяться во времени.

Перейдем к третьей стратегии, DYNRES, где определенный объем ресурсов резервируется для трафика каждого типа, а остальные ресурсы динамически распределяются между ними. Значения R_L выбираются эквивалентными соответствующим значениям γ в ранее рассмотренной стратегии выделения ресурсов STAT, а R_N считается нулевым. Другими словами, сравниваются статические

и полудинамические варианты распределения. Заметим, что для меньшего числа устройств NB-IoT характеристики стратегии DYNRES идентичны характеристикам стратегии DYN. Однако увеличение значений вероятности блокировок для DYNRES растет медленнее, чем в случае DYN. Причиной этому является тот факт, что часть ресурсов, которые мог бы занять LTE-трафик, занята динамическим разделением. Кроме того, при более высоких нагрузках трафика NB-IoT вероятность блокировки LTE для DYNRES никогда не будет превышать соответствующее значение для системы со стратегией STAT. Для крайне большого числа устройств NB-IoT кривая для DYNRES асимптотически приближается к кривой для системы STAT, но не пересекает ее.

Стратегия DYNRES не хуже, чем стратегии STAT и DYN. Объясняется это тем, что стратегия DYNRES включает основные свойства первых двух схем распределения ресурсов. Стратегия DYNRES ведет себя так же, как и стратегия DYN при низких нагрузках и стратегия STAT при высоких нагрузках. Следовательно, стратегия DYNRES может быть рекомендована для повышения надежности системы.

Представим в ортогональном разрезе рис. 5, который показывает вероятность блокировки сеанса NB-IoT в сравнении с общим числом подключенных LTE-устройств. Как и в предыдущем случае, будем подбирать параметры для стратегии DYNRES таким образом, чтобы объемы ресурсов, зарезервированных для NB-IoT в STAT и DYNRES, были равными. Важно отметить, что в этом случае R_N равно $(1 - \gamma)$ вместо γ . Значения R_L считаются равными нулю. Для такого симметричного случая наблюдается то же качественное поведение, что и на рис. 4. Тем не менее имеются заметные количественные различия между рис. 4 и 5. Значения вероятности блокировки NB-IoT на порядок ниже, чем для LTE. Это связано с более низкими потребностями в ресурсах отдельной сессии NB-IoT, что,

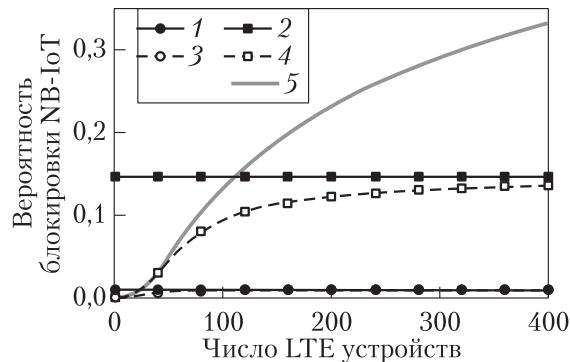


Рис. 5 Вероятность блокировки NB-IoT в зависимости от предложенной нагрузки LTE: 1 — STAT, $B = 0,8$; 2 — STAT, $B = 0,6$; 3 — DYNRES, $R_L = 0,8$; 4 — DYNRES, $R_L = 0,6$; 5 — DYN

в свою очередь, ведет к увеличению шансов на прием обслуживания даже в почти полностью загруженной системе. Кроме того, способ выделения каналов NB-IoT во внутриполосном режиме также соответствует режиму движения датчика. Сессии LTE занимают весь RB, тогда как трафик NB-IoT получает полный RB, хотя одна сессия и не занимает его полностью. Поэтому следующие несколько сессий NB-IoT гарантированно будут обслуживаться, поскольку оставшаяся часть уже выделенного RB не может быть занята каким-либо потоком LTE. Независимо от количественных значений трафика LTE система DYNRES всегда находится в выигрышном положении.

5 Заключение

В статье представлены методы эффективного сбора разнородных данных беспроводной сетью Интернета вещей. Основное внимание сосредоточено на передаче высокоскоростных видеопотоков, поступающих от камер наблюдения, подключенных к LTE, и низкоскоростных сенсорных данных, собираемых с многочисленных устройств, подключенных к технологии NB-IoT (с учетом внутриполосного развертывания NB-IoT). Разработана аналитическая модель оценки эффективности распределения радиоресурсов. Модель позволяет исследовать особенности совместного использования ресурсов LTE и NB-IoT. Наконец, на примере оператора наблюдения, реализующего систему мониторинга, проведена оценка трех альтернативных стратегий совместного использования ресурсов соты LTE с поддержкой технологии NB-IoT.

Проведенное численное исследование показало, что простейшая стратегия STAT очень чувствительна к предлагаемой нагрузке и требует точной информации об уровне поступающей нагрузки. Также показано, что стратегия DYN с полностью динамическим распределением ресурсов позволяет достичь наивысшей пропускной способности системы, но не может гарантировать требуемую надежность обслуживания. Предложенная стратегия динамического распределения ресурсов с резервированием, DYNRES, удовлетворяет требованиям надежности при сохранении коэффициента использования ресурсов на высоком уровне. Стратегия DYNRES рекомендуется для будущих развертываний IoT в мобильных сетях 5G, в то время как разработанная аналитическая модель может применяться для оценки эффективности будущих решений.

Литература

1. The zettabyte era: Trends and analysis. — Cisco, 2017. White Paper. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>.
2. Murdoch T., Detsky A. The inevitable application of big data to health care // JAMA — J. Am. Med. Assoc., 2013. Vol. 309. No. 13. P. 1351–1352. doi: 10.1001/jama.2013.393.

3. Jagadish H. V., Gehrke J., Labrinidis A., Papakonstantinou Y., Patel J. M., Ramkrishnan R., Shahabi C. Big data and its technical challenges // Commun. ACM, 2014. Vol. 57. No. 7. P. 86–94. doi: 10.1145/2611567.
4. Petrov V., Samuylov A., Begishev V., Moltchanov D., Andreev S., Samouylov K., Koucheryavy Y. Vehicle-based relay assistance for opportunistic crowdsensing over Narrowband IoT (NB-IoT) // IEEE Internet Things, 2017. Vol. 99. P. 1. doi: 10.1109/JIOT.2017.2670363.
5. Margelis G., Piechocki R., Kaleshi D., Thomas P. Low throughput networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations // IEEE 2nd World Forum on Internet of Things Proceedings. Milan, Italy, 2015. P. 181–186.
6. Andreev S., Galinina O., Pyattaev A., Gerasimenko M., Tirronen T., Torsner J., Sachs J., Dohler M., Koucheryavy Y. Understanding the IoT connectivity landscape: A contemporary M2M radio technology roadmap // IEEE Commun. Mag., 2015. Vol. 53. No. 9. P. 32–40. doi: 10.1109/MCOM.2015.7263370.
7. Rico-Alvarino A., Vajapeyam M., Xu H., Wang X., Blankenship Y., Bergman J., Tirronen T., Yavuz E. An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications // IEEE Commun. Mag., 2016. Vol. 54. No. 6. P. 14–21. doi: 10.1109/MCOM.2016.7497761.
8. Lyon D. Surveillance, snowden and big data: Capacities, consequences, critique // Big Data Society, 2014. Vol. 1. No. 2. P. 1–13. doi: 10.1177/2053951714541861.
9. Zhu W., Cui P., Wang Z., Hua G. Multimedia big data computing // IEEE Multimedia, 2015. Vol. 22. No. 3. P. 96–105. doi: 10.1109/MMUL.2015.66.
10. Che D., Safran M., Peng Z. From big data to big data mining: Challenges, issues, and opportunities // 18th Conference (International) on Database Systems for Advanced Applications Proceedings. — New York, NY, USA, 2014. P. 1–15.
11. Zuech R., Khoshgoftaar M., Wald R. Intrusion detection and big heterogeneous data: A survey // J. Big Data, 2015. Vol. 2. No. 1. P. 3–7. doi: 10.1186/s40537-015-0013-4.
12. Ramachandran U., Hong K., Iftode L., Jain R., Kumar R., Rothermel K., Shin J., Sivakumar R. Large-scale situation awareness with camera networks and multi-modal sensing // Proc. IEEE, 2012. Vol. 100. No. 4. P. 878–892. doi: 10.1109/JPROC.2011.2182093.
13. Standardization of NB-IoT completed. — 3GPP, 2016. http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb_iot_complete.
14. Study on provision of low-cost machine-type communications (MTC) user equipments (UEs) based on LTE. 3GPP, 2013. Technical Report 36.888/r12. <http://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2578>.
15. Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT). 3GPP, 2015. Technical Report 45.820/r13. <http://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2719>.
16. Ratasuk R., Vejlgaard B., Mangalvedhe N., Ghosh A. NB-IoT system for M2M communication // IEEE Wireless Communications and Networking Conference Proceedings. — Daha, Qatar, 2016. P. 1–5.
17. Dynamic end-to-end network slicing for 5G. — Nokia, 2017. White Paper. <http://resources.ext.nokia.com/asset/200339>.

18. *Borodakiy V. Y., Buturlin I. A., Gudkova I. A., Samouylov K. E.* Modelling and analysing a dynamic resource allocation scheme for M2M traffic in LTE networks // NEW2AN Conference Proceedings. — St. Petersburg, Russia, 2013. P. 420–426.
19. *Wang P., Lin X., Adhikary A., Grovlen A., Sui Y., Blankenship Y., Bergman J., Razaghi H. S.* A primer on 3GPP narrowband Internet of Things // IEEE Commun. Mag., 2017. Vol. 55. No. 3. P. 117–123. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM.

Поступила в редакцию 12.07.17

RADIO RESOURCE DISTRIBUTION STRATEGIES IN HETEROGENEOUS NETWORKS WITH NARROW-BAND IoT TRAFFIC

V.O. Begishev¹, A. K. Samuylov¹, D. A. Molchanov¹, and K. E. Samouylov^{1,2}

¹Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, 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: Growth in volumes and types of data that have to be supported in future Internet of Things (IoT) applications is one of the key features in mobile networks transition from 4G+ to 5G. In this regard, IoT service providers have to ensure the massive multimedia data transfers in conjunction with machine-type messages. The need for simultaneous support of several categories of traffic implies the heterogeneity of 5G networks. To cope with this problem, 3GPP proposed and standardized the in-band deployment of Narrow-Band IoT (NB-IoT) technology. The paper presents a set of feasible strategies for sharing resources between multimedia data and data from sensors in a hybrid LTE/NB-IoT wireless network. Based on the developed analytical framework, the paper provides a comparison of the proposed strategies, while giving recommendations on the choice of the optimal one.

Keywords: Internet of Things; NB-IoT (Narrow-Band IoT); LTE (Long-Term Evolution); analytical model; resource allocation strategies

DOI: 10.14357/08696527170405

Acknowledgments

The publication was prepared with the support of the RUDN University Program “5-100,” was funded by the Russian Foundation for Basic Research (scientific projects No. 16-07-00766 and No. 17-07-00845), and was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 02.a03.21.000).

References

1. The zettabyte era: Trends and analysis. 2017. Cisco. White Paper. Available at: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html> (accessed November 3, 2017).
2. Murdoch, T., and A. Detsky. 2013. The inevitable application of big data to health care. *JAMA — J. Am. Med. Assoc.* 309(13):1351–1352. doi: 10.1001/jama.2013.393.
3. Jagadish, H. V., J. Gehrke, A. Labrinidis, Y. Papakonstantinou, J. M. Patel, R. Ramakrishnan, and C. Shahabi. 2014. Big data and its technical challenges. *Commun. ACM* 57(7):86–94. doi: 10.1145/2611567.
4. Petrov, V., A. Samuylov, V. Begishev, D. Molchanov, S. Andreev, K. Samouylov, and Y. Koucheryavy. 2017. Vehicle-based relay assistance for opportunistic crowd sensing over Narrowband IoT (NB-IoT). *IEEE Internet Things* 99:1. doi: 10.1109/JIOT.2017.2670363.
5. Margelis, G., R. Piechocki, D. Kaleshi, and P. Thomas. 2015. Low throughput networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations. *IEEE 2nd World Forum on Internet of Things Proceedings*. Milan, Italy. 181–186.
6. Andreev, S., O. Galinina, A. Pyattaev, M. Gerasimenko, T. Tirronen, J. Torsner, J. Sachs, M. Dohler, and Y. Koucheryavy. 2015. Understanding the IoT connectivity landscape: A contemporary M2M radio technology roadmap. *IEEE Commun. Mag.* 53(9):32–40. doi: 10.1109/MCOM.2015.7263370.
7. Rico-Alvarino, A., M. Vajapeyam, H. Xu, X. Wang, Y. Blankenship, J. Bergman, T. Tirronen, and E. Yavuz. 2016. An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications. *IEEE Commun. Mag.* 54(6):14–21. doi: 10.1109/MCOM.2016.7497761.
8. Lyon, D. 2014. Surveillance, snowden and big data: Capacities, consequences, critique. *Big Data Society* 1(2):1–13. doi: 10.1177/2053951714541861.
9. Zhu, W., P. Cui, Z. Wang, and G. Hua. 2015. Multimedia big data computing. *IEEE Multimedia* 22(3):96–105. doi: 10.1109/MMUL.2015.66.
10. Che, D., M. Safran, and Z. Peng. 2013. From big data to big data mining: Challenges, issues, and opportunities. *18th Conference (International) on Database Systems for Advanced Applications Proceedings*. New York, NY. 1–15.
11. Zuech, R., M. Khoshgoftaar, and R. Wald. 2015. Intrusion detection and big heterogeneous data: A survey. *J. Big Data* 2(1):3. doi: 10.1186/s40537-015-0013-4.
12. Ramachandran, U., K. Hong, L. Iftode, R. Jain, R. Kumar, K. Rothermel, J. Shin, and R. Sivakumar. 2012. Large-scale situation awareness with camera networks and multi-modal sensing. *Proc. IEEE* 100(4):878–892. doi: 10.1109/JPROC.2011.2182093.
13. 3GPP. 2016. Standardization of NB-IoT completed. Available at: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb_iot_complete (accessed August 2, 2017).
14. 3GPP. 2013. Study on provision of low-cost machine-type communications (MTC) user equipments (UEs) based on LTE. Technical Report 36.888/r12. Available at: <http://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2578> (accessed June 23, 2017).
15. 3GPP. 2015. Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT). Technical Report 45.820/r13. Available at: <http://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2719> (accessed June 7, 2017).

16. Ratasuk, R., B. Vejlgaard, N. Mangalvedhe, and A. Ghosh. 2016. NB-IoT system for M2M communication. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Proceedings*. Doha, Qatar. 1–5.
17. Dynamic end-to-end network slicing for 5G. 2017. Nokia. White Paper. Available at: <http://resources.ext.nokia.com/asset/200339> (accessed June 15, 2017).
18. Borodakiy, V. Y., I. A. Buturlin, I. A. Gudkova, and K. E. Samouylov. 2013. Modelling and analysing a dynamic resource allocation scheme for M2M traffic in LTE networks. *NEW2AN Conference Proceedings*. St. Petersburg, Russia. 420–426.
19. Wang, P., X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, and H. S. Razaghi. 2017. A primer on 3GPP narrowband Internet of Things. *IEEE Commun. Mag.* 55(3):117–123. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM.

Received July 12, 2017

Contributors

Begishev Vyacheslav O. (b. 1988) — PhD student, Department of Applied Probability and Informatics, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; begishev_vo@rudn.university

Samuylov Andrey K. (b. 1988) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; samuylov_ak@rudn.university

Molchanov Dmitri A. (b. 1978) — Candidate of Science (PhD) in technology, associate professor, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; molchanov_da@rudn.university

Samouylov Konstantin E. (b. 1955) — Doctor of Science in technology, professor, Head of the Department of Applied Probability and Informatics, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, 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; samuylov_ke@rudn.university

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАПАСОМ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОДУКТА В СХЕМЕ РЕГЕНЕРАЦИИ С ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ЗАДЕРЖКОЙ ПОСТАВКИ И ПЕРИОДОМ РЕАЛЬНОГО ПОПОЛНЕНИЯ

П. В. Шнурков¹, Е. Ю. Пименова²

Аннотация: Исследуется задача оптимального управления запасом в стохастической модели регенерации. Данная проблема формализуется в виде экстремальной задачи для некоторого стационарного стоимостного показателя, зависящего от функции распределения времени от момента очередного пополнения запаса до момента заказа на следующее пополнение. Найден явный вид этого показателя в форме дробно-линейного интегрального функционала, для которого получены представления подынтегральных функций числителя и знаменателя. На основании теории об экстремуме функционала такого вида установлено, что оптимальное управление является детерминированным и определяется точкой достижения глобального экстремума функции, для которой получено аналитическое представление. Найдены аналитические достаточные условия на исходные характеристики модели, при которых существует оптимальное детерминированное управление.

Ключевые слова: оптимальное управление в стохастической системе; управление запасом; управляемый регенерирующий процесс

DOI: 10.14357/08696527170406

1 Введение

В настоящей работе рассматривается математическая модель работы некоторой системы, предназначеннной для хранения и поставки потребителю одного вида продукта. Продукт называется непрерывным, поскольку множество возможных значений его объема представляет собой ограниченный сверху интервал множества действительных чисел. В качестве продукта могут выступать сырьевые ресурсы, такие как вода, нефть, газ, древесина и т. п., а также совокупность большого количества однотипных товаров. Особо выделим так называемый энергетический ресурс, т. е. объем электрического заряда, аккумулируемого в некотором устройстве, предназначенном для питания какой-либо мобильной

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», psnurkov@hse.ru

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», eypimenova@edu.hse.ru

технической системы. Во всех системах указанного вида необходимо планировать момент времени, в который производится заказ на пополнение запаса. Решение задачи оптимального планирования момента пополнения является актуальным.

Настоящая работа является продолжением цикла исследований стохастических моделей управления запасом регенерационного характера, начатый работами П. В. Шнуркова и Р. В. Мельникова [1–3]. Исследованная в этих работах общая модель управления запасом непрерывного продукта в форме случайного регенерирующего процесса является развитием и усложнением классической детерминированной модели с повторяющимися циклами, изложенной в научных и учебных изданиях, посвященных теории управления запасами [4, 5]. Особое направление в теории стохастических систем управления запасом образуют работы, в которых исследуются более сложные полумарковские модели (отметим некоторые исследования последних лет [6–9]). Однако исследования различных вариантов регенерационных моделей еще далеки от завершения, и данное направление по-прежнему является актуальным.

Модель управления запасом, исследуемая в настоящей работе, имеет свои отличительные особенности: в данной модели пополнение происходит не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени (периода непосредственного пополнения); в указанный период пополнение происходит с заданной скоростью $\lambda > 0$. Целевым функционалом в настоящей модели является средняя удельная прибыль на интервале регенерации. Такая модель более приближена к реальным условиям рынка. Рассмотренная ниже математическая проблема не была исследована в упомянутых выше работах [1–3].

Проблема оптимального управления запасом, исследуемая в настоящей работе, по своей математической форме представляет собой задачу нахождения безусловного экстремума стационарного стоимостного показателя качества управления. Случайным параметром управления является время от момента очередного пополнения запаса до момента заказа на следующее пополнение. Стационарный стоимостный показатель зависит от функции распределения параметра управления. Таким образом, необходимо решить экстремальную задачу для указанного функционала на некотором множестве функций распределения.

Стационарный стоимостный показатель, связанный с основным регенерирующим процессом, представляет собой дробно-линейный интегральный функционал. Для решения соответствующей экстремальной задачи используется теорема об экстремуме функционала данного вида [10, 11]. На основании этой теоремы устанавливается, что решение исходной задачи определяется экстремальными свойствами так называемой основной функции дробно-линейного интегрального функционала, представляющей собой отношение подынтегральных функций числителя и знаменателя. В работе получены явные аналитические представления для этих функций через заданные исходные характеристики математической модели. При этом можно утверждать, что если основная функция достигает глобального экстремума (максимума или минимума), то решение исходной

экстремальной задачи существует и достигается на вырожденном вероятностном распределении, сосредоточенном в точке достижения глобального экстремума. Таким образом, в указанном случае оптимальное управление является детерминированным и определяется точкой глобального экстремума некоторой явно заданной функции.

Кроме того, в данной работе доказано утверждение о существовании оптимального детерминированного управления, которое позволяет указать аналитические условия на исходные характеристики модели, при выполнении которых оптимальное управление существует.

2 Описание модели и задание основных характеристик

Экономическая система, рассматриваемая в настоящей работе, представляет собой отдельный (изолированный) склад, в котором хранится один вид продукта. Объем запаса данного продукта на складе в момент времени t будем обозначать через $x(t)$. Этот параметр может принимать значения из множества вещественных чисел $(-\infty; \tau]$, где $\tau > 0$ — заданная величина (максимальная вместимость склада).

Приведем общее описание процедуры потребления и пополнения запаса продукта в данной модели. Спрос на товар является детерминированной величиной. Скорость потребления продукции определяется постоянным параметром α , $\alpha > 0$. В момент начала функционирования системы либо в очередной момент пополнения запаса определяется момент времени, когда будет производиться следующий заказ на пополнение запаса. Случайная длительность периода времени до момента заказа η играет роль параметра управления. Конкретное значение управления (решения) определяется как реализация случайной величины η . Функция распределения $G(u) = P(\eta < u)$ называется управляющим вероятностным распределением. Поставка продукции на склад пополняет уровень запаса до уровня τ , $\tau > 0$, $\tau \in R$. В момент заказа начинается так называемый период задержки поставки, т. е. время, в течение которого выполняется заказ на пополнение запаса. Период задержки является заданной детерминированной величиной Δ_0 . В этот период потребление продукта продолжается с той же заданной скоростью $\alpha > 0$.

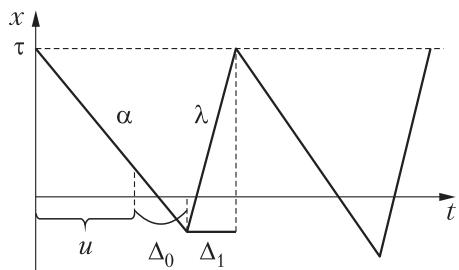
В момент окончания периода задержки поступает заказанная партия продукта и начинается так называемый период непосредственного пополнения. В этот период потребление прекращается, а пополнение производится со скоростью $\lambda > 0$.

Нетрудно заметить, что если время до момента заказа равно u , а длительность периода задержки равна Δ_0 , то длительность периода непосредственного пополнения запаса равна величине

$$\Delta_1 = \frac{\alpha}{\lambda} (u + \Delta_0) .$$

В момент окончания периода непосредственного пополнения запас продукта в системе принимает значение τ . После этого вновь планируется момент следующего заказа на пополнение. Эволюция системы после пополнения и достижения уровня τ происходит независимо от прошлого и по тем же самым закономерностям.

Общий характер поведения процесса $x(t)$ показан на рисунке.



Траектория случайного процесса $x(t)$

Дадим формальное описание основного случайного процесса.

Пусть $x(t)$ — объем запаса в системе в момент времени t . Обозначим через t_n , $n = 0, 1, 2, \dots$, $t_0 = 0$, моменты пополнения запаса в системе до максимального уровня τ . Зафиксируем момент t_n . Обозначим также через η_n случайное время от момента пополнения t_n до момента следующего заказа на пополнение. Случайные величины η_n , $n = 0, 1, 2, \dots$, независимы и имеют распределение $G(u) = P(\eta_n < u)$.

Тогда выполняются следующие равенства:

$$t'_n = t_n + \eta_n \text{ — момент следующего заказа;} \\$$

$$t^*_n = t_n + \eta_n + \Delta_0 \text{ — момент начала непосредственного пополнения;} \\$$

$$t_{n+1} = t_n + \eta_n + \Delta_0 + \Delta_1 \text{ — момент следующего пополнения запаса.}$$

Траектория случайного процесса $x(t)$ определяется соотношениями:

$$x(t) = x(t_n) - \alpha(t - t_n), \quad t_n \leq t \leq t_n + \eta_n + \Delta_0 = t^*_n; \\ x(t) = x(t^*_n) + \lambda(t - t^*_n), \quad t^*_n \leq t \leq t^*_n + \Delta_1 = t_{n+1}.$$

Будем предполагать, что после каждого момента пополнения запаса t_n эволюция процесса $x(t)$ продолжается независимо от прошлого и по одним и тем же закономерностям, описанным выше. Тогда случайный процесс $x(t)$ является регенерирующими, а моменты пополнения запаса до максимального уровня τ , т. е. случайные моменты t_n , представляют собой моменты регенерации этого процесса. Интервалы времени между последовательными моментами регенерации $[t_n; t_{n+1}]$ называются периодами регенерации.

Общее понятие и основы теории стохастической регенерации имеются в фундаментальной книге А. А. Боровкова [12]. Более подробное изложение теории регенерирующих процессов содержится в книге Г. П. Климова [13], а также в работе В. В. Рыкова и Д. В. Козырева [14].

Теперь перейдем к описанию управления в модели регенерации.

Решение или управление определяется на каждом периоде регенерации $[t_n; t_{n+1})$ в момент времени t_n , непосредственно после завершения предыдущего пополнения. Само управление u_n представляет собой случайную величину, принимающую значения во множестве допустимых управлений $\bar{U} = [0, \infty]$, т. е. в расширенном множестве вещественных чисел. По содержанию величина u_n представляет собой время от момента t_n до планируемого следующего момента заказа на пополнение запаса, т. е. формально совпадает с величиной η_n .

Отметим, что возможное значение управления $u = \infty$ соответствует такому решению, при котором пополнение запаса вообще не планируется. Конкретное решение на некотором периоде регенерации $[t_n; t_{n+1})$ представляет собой реализацию случайной величины u_n , имеющей распределение $G(u)$, которое будет называться управляющим вероятностным распределением.

Обозначим через Γ множество всех возможных вероятностных распределений, заданных на расширенном множестве вещественных чисел $\bar{U} = [0, \infty]$, т. е. на множестве допустимых управлений. Предположим, что задан некоторый функционал $I : \Gamma \rightarrow R$. Данный функционал будет представлять собой показатель качества управления в исследуемой стохастической модели. Тогда проблема оптимального управления регенерирующим процессом $x(t)$ представляется в виде экстремальной задачи:

$$I(G) \underset{G \in \Gamma}{\rightarrow} \text{extr}. \quad (1)$$

Оптимальная стратегия управления запасом будет определяться функцией распределения $G^*(u) \in \Gamma$, которая является решением задачи (1), т. е. доставляет глобальный экстремум функционалу $I(G)$.

В дальнейшем в роли $I(G)$ будет фигурировать стационарный стоимостный показатель, имеющий смысл средней удельной прибыли. Данный показатель будет определяться исходными стоимостными характеристиками модели. Введем эти характеристики.

Обозначим:

$c_1(x)$ — затраты, связанные с хранением реального запаса объемом x , $x > 0$, в единицу времени; $c_1(x) = 0$, $x \leq 0$;

$c_2(x)$ — штрафы (потери), связанные с дефицитом продукта объема x , $x < 0$, в единицу времени; $c_2(x) = 0$, $x \geq 0$;

$c_3(\alpha(u + \Delta_0))$ — фиксированная плата поставщику за поставку продукта объема $\alpha(u + \Delta_0)$, т. е. плата за пополнение запаса;

$d_1(x)$ — цена поставки потребителю единицы продукта в единицу времени при условии, что объем имеющегося запаса равен $x > 0$;

$d_2(x)$ — цена поставки потребителю единицы продукта в единицу времени при условии, что в системе имеется дефицит объема x , $x < 0$.

Функции предполагаются заданными. В дальнейшем эти функции будут входить в представление для целевого функционала — показателя качества управления в рассматриваемой модели.

3 Основное утверждение о представлении стационарного стоимостного показателя

Одним из основных результатов данного исследования является утверждение о представлении стационарного показателя $I(G)$ в форме дробно-линейного интегрального функционала.

Теорема 1. В рассматриваемой стохастической модели регенерации стационарный показатель качества управления представляется в виде дробно-линейного интегрального функционала

$$I(G) = \frac{\int_0^\infty A(u) dG(u)}{\int_0^\infty B(u) dG(u)}, \quad (2)$$

где подынтегральные функции числителя и знаменателя задаются следующими формулами:

– при $\Delta_0 < \tau/\alpha$:

$$A(u) = \begin{cases} \int_0^{u+\Delta_0} [\alpha d_1(\tau - \alpha t) - c_1(\tau - \alpha t)] dt - \\ - c_1 (\tau - \alpha (u + \Delta_0)) \frac{\alpha}{\lambda} (u + \Delta_0) - c_3 (\alpha (u + \Delta_0)) , \\ \qquad \qquad \qquad 0 \leq u < \frac{\tau}{\alpha} - \Delta_0 ; \\ \int_0^{\tau/\alpha} [\alpha d_1(\tau - \alpha t) - c_1(\tau - \alpha t)] dt + \\ + \int_{\tau/\alpha}^{u+\Delta_0} [\alpha d_2(\tau - \alpha t) - c_2(\tau - \alpha t)] dt - \\ - c_2 (\tau - \alpha (u + \Delta_0)) \frac{\alpha}{\lambda} (u + \Delta_0) - c_3 (\alpha (u + \Delta_0)) , \\ \qquad \qquad \qquad u > \frac{\tau}{\alpha} - \Delta_0 ; \end{cases} \quad (3)$$

– при $\Delta_0 > \tau/\alpha$:

$$A(u) = \int_0^{\tau/\alpha} [\alpha d_1(\tau - \alpha t) - c_1(\tau - \alpha t)] dt + \int_{\tau/\alpha}^{u+\Delta_0} [\alpha d_2(\tau - \alpha t) - c_2(\tau - \alpha t)] dt - c_2(\tau - \alpha(u + \Delta_0)) \frac{\alpha}{\lambda}(u + \Delta_0) - c_3(\alpha(u + \Delta_0)), \quad u \geq 0. \quad (4)$$

При этом во всех вариантах функция $B(u)$ имеет вид:

$$B(u) = u + \Delta_0 + \frac{\alpha}{\lambda}(u + \Delta_0) = (u + \Delta_0) \left(1 + \frac{\alpha}{\lambda}\right). \quad (5)$$

Исходным пунктом доказательства теоремы 1 является известное утверждение о том, что для регенерирующих процессов с управлением стационарный показатель качества управления представим в виде дробно-линейного интегрального функционала, имеющего аналитическую форму (2), где $G(\cdot)$ — вероятностное распределение, определяющее выбираемое управление [15, 16]. Таким образом, для доказательства теоремы достаточно получить явные представления для подынтегральных функций $A(u)$ и $B(u)$. По своему теоретическому содержанию эти функции представляют собой условные математические ожидания прибыли, полученной на одном периоде регенерации, и длительности периода регенерации соответственно, определяемые при условии, что в начальный момент данного периода было принято решение u .

Полное доказательство теоремы 1 приведено в приложении к настоящей работе [17].

Из утверждения теоремы 1 следует, что функции $A(u)$ и $B(u)$ определены аналитически при всех значениях аргумента $u \geq 0$ и заданных значениях исходных параметров. Соответственно, полностью определена функция $C(u) = A(u)/B(u)$, которая будет в дальнейшем называться основной для рассматриваемого дробно-линейного интегрального функционала (2).

4 Решение проблемы оптимального управления запасом

Используя утверждение теоремы 1, получаем, что проблема оптимального управления запасом в рассматриваемой модели регенерации, которая формально представляется в виде экстремальной задачи (1), принимает вид задачи безусловного экстремума для дробно-линейного интегрального функционала (2), подынтегральные функции числителя и знаменателя которого заданы явными формулами (3)–(5).

Проблема безусловного экстремума дробно-линейного функционала была исследована в работах [15; 16, гл. 10]. В данном исследовании будет использоваться

новая, обобщенная и усиленная форма теоремы о безусловном экстремуме дробно-линейного интегрального функционала, доказанная П. В. Шнурковым [10, 11]. Приведем формулировку этой теоремы, следуя работе [10]. При этом ограничимся только первым утверждением указанной теоремы, которое непосредственно используется в дальнейших рассуждениях.

Теорема 2. *Рассмотрим экстремальную задачу (1) для дробно-линейного интегрального функционала (2). Предположим, что для этой задачи выполняются предварительные условия, приведенные в работе [10]. Предположим также, что функция $B(u)$ обладает свойством строгой знакопостоянности, т. е. удовлетворяет одному из условий: либо $B(u) > 0$, $u \in U$, либо $B(u) < 0$, $u \in U$. Тогда справедливы следующие утверждения.*

Если функция $C(u) = A(u)/B(u)$ ограничена сверху или снизу и достигает глобального экстремума на множестве U (максимума или минимума), то соответствующий экстремум дробно-линейного интегрального функционала $I(\Psi)$ на множестве Γ существует и достигается на вырожденной вероятностной мере, сосредоточенной в точке, в которой функция $C(u)$ достигает соответствующего экстремума, причем выполняются соотношения:

$$\max_{\Psi \in \Gamma} I(\Psi) = \max_{\Psi^* \in \Gamma^*} I(\Psi^*) = \max_{u \in U} \frac{A(u)}{B(u)};$$

$$\min_{\Psi \in \Gamma} I(\Psi) = \min_{\Psi^* \in \Gamma^*} I(\Psi^*) = \min_{u \in U} \frac{A(u)}{B(u)}.$$

При этом сформулированные выше утверждения могут выполняться как по отдельности для одного из видов экстремума, так и совместно для обоих видов экстремума.

Проверим выполнение условий теоремы 2. В рассматриваемой задаче Γ есть множество функций распределения случайных величин, принимающих значения во множестве допустимых управлений $U = [0, \infty]$. На этом множестве функционал $I(G)$, $G \in \Gamma$, определен, т. е. интегралы в числителе и знаменателе указанного функционала являются сходящимися. Кроме того, подынтегральная функция знаменателя $B(u)$, задаваемая формулой (5), является строго положительной при всех значениях аргумента $u \in U$. Таким образом, утверждения теоремы справедливы и решение задачи безусловного экстремума для данного функционала полностью определяется экстремальными свойствами основной функции $A(u)/B(u)$, для которой известно явное аналитическое представление.

Рассмотрим вариант, когда основная функция $A(u)/B(u)$ достигает глобального (абсолютного) максимума на множестве допустимых управлений $u \in U$ в некоторой точке u_* . Тогда, согласно первому утверждению теоремы 2, решение исходной экстремальной задачи для дробно-линейного интегрального функционала $I(G)$ существует и достигается на вырожденном вероятностном распределении $G_{u_*}(u)$, сосредоточенном в точке u_* :

$$G_{u_*}(u) = \begin{cases} 0, & u \leq u_*; \\ 1, & u > u_*. \end{cases} \quad (6)$$

Кроме того, имеет место соотношение:

$$\max_{G \in \Gamma} I(G) = \max_{G \in \Gamma^*} I(G) = \max_{u \in U} \frac{A(u)}{B(u)},$$

где Γ^* — множество вырожденных распределений вида (7) для всех возможных точек $u_* \in U$.

Таким образом, необходимо исследовать на глобальный экстремум основную функцию рассматриваемого дробно-линейного функционала, т. е. найти решение экстремальной задачи

$$\frac{A(u)}{B(u)} \rightarrow \max_{u \in U}.$$
 (7)

Если удастся найти точку $u_* \in U$, в которой достигается глобальный максимум основной функции $A(u)/B(u)$, т. е. решение задачи (7), то из первого утверждения теоремы 2 непосредственно будет следовать, что решение исходной задачи существует и достигается на вырожденном вероятностном распределении вида (6). Точка $u = u_* \in U$ определяет оптимальное детерминированное значение параметра управления.

5 Достаточные условия непрерывности основной функции и существование детерминированного оптимального управления

В данном разделе будут получены аналитические условия на исходные характеристики рассматриваемой математической модели, при выполнении которых можно утверждать, что основная функция $C(u) = A(u)/B(u)$ дробно-линейного интегрального функционала $I(G)$ достигает глобального экстремума на множестве возможных значений параметра управления.

Докажем сначала вспомогательное утверждение о непрерывности функции $A(u)$, характеризующей математическое ожидание прибыли, полученной на периоде регенерации.

Лемма 1. *Предположим, что выполняются следующие условия:*

- (1) *функция $c_1(x)$ непрерывна при любых значениях аргумента $x \geq 0$;*
- (2) *функция $c_2(x)$ непрерывна при любых значениях аргумента $x \leq 0$;*
- (3) *функция $c_3(y)$ непрерывна при любых значениях аргумента $y \geq \alpha\Delta_0$.*

Тогда функция $A(u)$ непрерывна при всех значениях $u \geq 0$.

В доказательстве леммы 1 используются результаты классического анализа. Полностью оно приведено в приложении к работе [17].

Основываясь на утверждении леммы, можно доказать следующее утверждение относительно свойств основной функции данного дробно-линейного функционала.

Теорема 3. Предположим, что выполнены следующие условия, связанные со стоимостными характеристиками модели:

- (1) функция $c_1(x)$ непрерывна при любых значениях аргумента $x \geq 0$;
- (2) функция $c_2(x)$ непрерывна при любых значениях аргумента $x \leq 0$;
- (3) функция $c_3(y)$ непрерывна при любых значениях $y \geq \alpha\Delta_0$;
- (4) существует предел $\lim_{z \rightarrow -\infty} [\alpha d_2(z) - c_2(z)] = \gamma_2 < \infty$;
- (5) существует предел $\lim_{z \rightarrow -\infty} c_2(z) = c_1^{(-)} < \infty$;
- (6) существует предел $\lim_{z \rightarrow \infty} c_3(z)/z = c_3^{(+)} < \infty$.

Тогда основная функция рассматриваемого дробно-линейного интегрального функционала (2), т. е. функция $A(u)/B(u)$, определяемая соотношениями (3) и (4), является непрерывной при всех конечных значениях аргумента $u \geq 0$ и существует конечный предел

$$\lim_{u \rightarrow \infty} \frac{A(u)}{B(u)} < \infty.$$

Доказательство теоремы 3 основано на лемме 1 и результатах классического анализа и приведено в приложении к настоящей работе [17].

Используя утверждение теоремы 3, можно указать аналитические условия на характеристики модели, при выполнении которых существует решение исходной задачи оптимального управления.

Теорема 4. Пусть выполнены условия теоремы 3. Тогда решение задачи оптимального управления запасом существует и достигается на детерминированном управлении $u_* \in \overline{U}$, которое представляет собой точку глобального максимума функции $A(u)/B(u)$ на множестве $\overline{U} = [0; \infty]$.

Доказательство. Итак, пусть выполнены условия теоремы 3. Тогда согласно утверждению этой теоремы основная функция дробно-линейного функционала (2) непрерывна при всех конечных значениях $u \geq 0$ и существует конечный предел

$$\hat{C} = \lim_{u \rightarrow \infty} \frac{A(u)}{B(u)} < \infty.$$

Отсюда следует, что функция $C(u) = A(u)/B(u)$ является непрерывной на множестве $\overline{U} = [0; \infty]$, т. е. на расширенной вещественной прямой, включающей дополнительный элемент $(+\infty)$.

Действительно, если доопределить функцию $C(u) = A(u)/B(u)$ в точке $u = +\infty$ при помощи соотношения $C(\infty) = \lim_{u \rightarrow \infty} A(u)/B(u) = \hat{C}$, то определение непрерывности выполняется также и в точке $u = +\infty$.

В то же время множество $\overline{U} = [0; \infty]$ является компактом (в классической книге П. С. Александрова [18] для обозначения этого понятия используется термин «бикомпакт»). В частности, известно, что существует взаимно однозначное и взаимно непрерывное отображение данного множества и замкнутого конечного отрезка $[0, a]$, где $a > 0$ — произвольное вещественное число. В таком случае множество \overline{U} является бикомпактом [18].

Таким образом, функция $C(u) = A(u)/B(u)$ является непрерывной на компакте (бикомпакте) $\overline{U} = [0; \infty]$. Тогда можно применить известную теорему Вейерштрасса о достижении функцией $C(u)$ своего минимального и максимального значений [18, 19].

Следовательно, основная функция $C(u) = A(u)/B(u)$ рассматриваемого дробно-линейного интегрального функционала достигает глобального максимума в некоторой точке $u_* \in \overline{U} = [0; \infty]$. Но тогда, как следует из утверждения теоремы 2, решение исходной задачи оптимального управления существует и достигается на вырожденном распределении, сосредоточенном в точке u_* , т. е. оптимальное управление является детерминированным и определяется указанной точкой $u_* \in \overline{U}$. Теорема 4 доказана.

6 Заключение

В настоящей работе проведено исследование одного из вариантов регенерационных моделей управления запасом непрерывного продукта. Основной особенностью этого исследования является его теоретическая завершенность. Установлено, что оптимальное управление в рассматриваемой модели является детерминированным и определяется точкой глобального экстремума (максимума) основной функции дробно-линейного интегрального функционала — показателя качества управления. При этом для упомянутой основной функции получено явное аналитическое представление через исходные характеристики модели.

В ряде исследований по математической теории надежности и теории оптимального обслуживания [15, 16] было установлено, что оптимальное управление регенерирующим процессом при принятии решения в момент регенерации является детерминированным. Аналогичный общий результат известен также в классической теории управления полумарковским процессом с конечным множеством состояний [20]. Более того, этот результат остается справедливым для самых сложных полумарковских моделей управления, в которых множества состояний и управлений имеют весьма общую структуру [21, 22]. Однако использование при решении задачи оптимального управления результата об экстремуме дробно-линейного интегрального функционала в виде теоремы 2 имеет существенные преимущества. Указанный результат позволяет не только установить

существование оптимального детерминированного управления, но и доказать, что нахождение этого управления сводится к классической задаче определения глобального экстремума заданной функции одного действительного переменного. В принятой терминологии эта функция называется основной для рассматриваемого дробно-линейного интегрального функционала.

Кроме того, в ходе проведенного исследования установлено, что при достаточно естественных аналитических условиях на исходные характеристики модели глобальный экстремум основной функции достигается в некоторой конкретной точке, принадлежащей множеству допустимых управлений (теорема 4). Таким образом, в настоящей работе реализован общий метод решения задач оптимального управления в стохастических моделях регенерации, примененный к конкретной модели управления запасом.

Литература

1. Шнурков П. В., Мельников Р. В. Оптимальное управление запасом непрерывного продукта в модели регенерации // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2006. Т. 13. Вып. 3. С. 434–452.
2. Шнурков П. В., Мельников Р. В. Исследование проблемы управления запасом непрерывного продукта при детерминированной задержке поставки // Автоматика и телемеханика, 2008. Вып. 10. С. 93–113.
3. Мельников Р. В. Исследование проблем управления запасом непрерывного продукта в стохастической модели регенерации: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: МГИЭМ, 2010. 133 с.
4. Рыжиков Ю. И. Теория очередей и управление запасами. — СПб.: Питер, 2001. 235 с.
5. Porteus E. L. Foundations of stochastic inventory theory. — Stanford, CA, USA: Stanford Business Book, 2002. 299 р.
6. Nino-Mora J. Restless bandit marginal productivity indices, diminishing returns, and optimal control of make-to-order/make-to-stock $M/G/1$ queues // Math. Oper. Res., 2006. Vol. 31. No. 1. P. 50–84.
7. Kumar S. R., Elango C. Semi Markov decision processes for service facility systems with perishable inventory // Int. J. Comput. Appl., 2010. Vol. 9. No. 4. P. 14–17.
8. Шнурков П. В., Иванов А. В. Анализ дискретной полумарковской модели управления запасом непрерывного продукта при периодическом прекращении потребления // Дискретная математика, 2014. Т. 26. Вып. 1. С. 143–154.
9. Иванов А. В. Анализ дискретной полумарковской модели управления запасом непрерывного продукта при периодическом прекращении потребления: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: НИУ ВШЭ, 2014. 120 с.
10. Шнурков П. В. О решении задачи безусловного экстремума для дробно-линейного функционала на множестве вероятностных мер // Докл. РАН, 2016. Т. 470. Вып. 4. С. 387–392.
11. Шнурков П. В., Горшенин А. К., Белоусов В. В. Аналитическое решение задачи оптимального управления полумарковским процессом с конечным множеством состояний // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 4. С. 72–88.

12. Боровков А. А. Теория вероятностей. — М.: Либроком, 2009. 656 с.
13. Клинов Г. П. Теория массового обслуживания. — М.: МГУ, 2011. 312 с.
14. Рыков В. В., Козырев Д. В. Основы теории массового обслуживания. — М.: Инфра-М, 2016. 223 с.
15. Барзилович Е. Ю., Кастанов В. А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. — М.: Советское радио, 1971. 272 с.
16. Вопросы математической теории надежности / Под ред. Б. В. Гнеденко. — М.: Радио и связь, 1983. 376 с.
17. Шнурков П. В., Пименова Е. Ю. Приложение к статье: Оптимальное управление запасом непрерывного продукта в схеме регенерации с детерминированной задержкой поставки и периодом реального пополнения, 2017. 10 с. <http://ipiran.ru/announce/shnurkov.pdf>.
18. Александров П. С. Введение в теорию множеств и общую топологию. — 2-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2010. 364 с.
19. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. — М.: Физматлит, 2004. Вып. 7. 572 с.
20. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений / Пер. с англ. — М.: Наука, 1977. 176 с. (Mine H., Osaki S. Markovian decision processes. — New York, NY, USA: Elsevier, 1970. 142 p.)
21. Luque-Vásquez F., Hernández-Lerma O. Semi-Markov control models with average costs // Appl. Math., 1999. Vol. 26. No. 3. P. 315–331.
22. Vega-Amaya O., Luque-Vásquez F. Sample-path average cost optimality for semi-Markov control processes on Borelspaces: Unbounded costs and mean holding times // Appl. Math., 2000. Vol. 27. No. 3. P. 343–367.

Поступила в редакцию 31.05.17

OPTIMAL INVENTORY CONTROL OF CONTINUOUS PRODUCT IN REGENERATION THEORY WITH DETERMINATE DELAY OF THE DELIVERY AND THE PERIOD OF REAL REPLENISHMENT

P. V. Shnurkov and E. Yu. Pimenova

National Research University Higher School of Economics, 34 Tallinskaya Str.,
Moscow 123458, Russian Federation

Abstract: The problem of inventory control in the stochastic model of regeneration is investigated. The purpose is to find a theoretical solution of the optimal control problem. To solve the problem, the authors have found the distribution function of a random time from the replenishment moment till the next order which determines the optimal replenishing product plan. It is proved that the initial problem solution exists and it is attained on the degenerate probability distribution. In addition, the optimal deterministic value of the control parameter is the global extreme point of a function which was expressed in an analytical

representation. The existence of deterministic optimal control assertion was proved. The authors have specified the analytical conditions on the initial model characteristics under which the optimal control exists.

Keywords: optimal control in stochastic systems; inventory management; controlled regenerating process

DOI: 10.14357/08696527170406

References

1. Shnurkov, P. V., and R. V. Mel'nikov. 2006. Optimal'noe upravlenie zapasom nepreryvnogo produkta v modeli regeneratsii [Optimal control of a continuous product inventory in the regeneration model]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Rev. Appl. Ind. Math.] 13(3):434–452.
2. Shnurkov, P. V., and R. V. Mel'nikov. 2008. Analysis of the problem of continuous-product inventory control under deterministic lead time]. *Automat. Rem. Contr.* 69(10):1734–1751.
3. Mel'nikov, R. V. 2010. Issledovaniye problem upravleniya zapasom v stokhasticheskoy modeli regeneratsii [Research inventory control problems in stochastic recovery model]. Moscow: MGIEM. PhD Thesis. 133 p.
4. Ryzhikov, Yu. I. 2001. *Teoriya ocheredey i upravlenie zapasami* [Queuing theory and inventory management]. St. Petersburg: Peter. 235 p.
5. Porteus, E. L. 2002. *Foundations of stochastic inventory theory*. Stanford, CA: Stanford Business Book. 299 p.
6. Nino-Mora, J. 2006. Restless bandit marginal productivity indices, diminishing returns, and optimal control of make-to-order/make-to-stock $M/G/1$ queues. *Math. Oper. Res.* 31(1):50–84.
7. Kumar, S. R., and C. Elango. 2010. Semi Markov decision processes for service facility systems with perishable inventory. *Int. J. Comput. Appl.* 9(4):14–17.
8. Snurkov, P. V., and A. V. Ivanov. 2015. Analysis of a discrete semi-Markov model of continuous inventory control with periodic interruptions of consumption. *Discrete Math.* 25(1):59–67.
9. Ivanov, A. V. 2014. *Analiz diskretnoy polumarkovskoy modeli upravleniya zapasom nepreryvnogo produkta pri periodicheskem prekrashchenii potrebleniya* [Analysis of a discrete semi-Markov control model of continuous product inventory in a periodic cessation of consumption]. Moscow: Moscow: National Research University Higher School of Economics. PhD Thesis. 120 p.
10. Shnurkov, P. V. 2016. Solution of the unconditional extremum problem for a linear-fractional integral functional on a set of probability measures. *Dokl. Math.* 94(2):550–554.
11. Shnurkov, P. V., A. K. Gorshenin, and V. V. Belousov. 2016. Analiticheskoe reshenie zadachi optimal'nogo upravleniya polumarkovskim protsessom s konechnym mnozhestvom sostoyaniy [An analytic solution of the optimal control problem for a semi-Markov process with a finite set of states]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(4):72–88.

12. Borovkov, A. A. 2009. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Librokom. 656 p.
13. Klimov, G. P. 2011. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing theory]. Moscow: MSU Publs. 312 p.
14. Rykov, V. V., and D. V. Kozyrev. 2016. *Osnovy teorii massovogo obsluzhivaniya* [Foundation of queuing theory]. Moscow: Infra-M. 223 p.
15. Barzilovich, E. Yu., and V. A. Kashtanov. 1971. *Nekotorye matematicheskie voprosy teorii obsluzhivaniya slozhnykh sistem* [Some mathematical questions in theory of complex systems maintenance]. Moscow: Sovetskoe radio. 272 p.
16. Gnedenko, B. V., ed. 1983. *Voprosy matematicheskoy teorii nadezhnosti* [Questions of mathematics reliability theory]. Moscow: Radio and communication. 376 p.
17. Shnurkov, P. V., and E. Yu. Pimenova. 2017. Prilozhenie k stat'e: Optimal'noe upravlenie zapasom nepreryvnogo produkta v skheme regeneratsii s determinirovannoy zaderzhkoy postavki i periodom real'nogo popolneniya [Appendix to article: Optimal inventory control of continuous product in regeneration theory with determinate delay of the delivery and the period of real replenishment]. 10 p. Available at: <http://ipiran.ru/announce/shnurkov.pdf> (accessed September 26, 2017).
18. Aleksandrov, P. S. 2010. *Vvedenie v teoriyu mnozhestv i obshchuyu topologiyu* [Introduction to the theory of sets and general topology]. 2nd ed. SPb.: Lan'. 364 p.
19. Kolmogorov, A. N., and S. V. Fomin. 1999. Elements of the theory of functions and functional analysis. Waltham, MA: Courier Corp. 288 p.
20. Mine, H., and S. Osaki. 1970. *Markovian decision processes*. New York, NY: Elsevier. 142 p.
21. Luque-Vásquez, F., and O. Hernández-Lerma. 1999. Semi-Markov control models with average costs. *Appl. Math.* 26(3):315–331.
22. Vega-Amaya, O., and F. Luque-Vásquez. 2000. Sample-path average cost optimality for semi-Markov control processes on Borel spaces: Unbounded costs and mean holding times. *Appl. Math.* 27(3):343–367.

Received May 31, 2017

Contributors

Shnurkov Peter V. (b. 1953) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, National Research University Higher School of Economics, 34 Tallinskaya Str., Moscow 123458, Russian Federation; pshnurkov@hse.ru

Pimenova Ekaterina Yu. — graduate Master student, National Research University Higher School of Economics, 34 Tallinskaya Str., Moscow 123458, Russian Federation; eyupimenova@edu.hse.ru

АРХИТЕКТУРА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ГЕТЕРОГЕННЫМ ВИЗУАЛЬНЫМ ПОЛЕМ*

А. В. Колесников¹, С. В. Листопад²

Аннотация: Гибридные интеллектуальные системы (ГиИС) интеграции моделей знаний экспертов решают неоднородные задачи (проблемы). При этом элементы ГиИС взаимодействуют на основе символьно-логических моделей знаний, что существенно ограничивает их возможности по сравнению с коллективами экспертов, успешно рассуждающих как логически, так и образно. Предлагается типовая архитектура ГиИС, синтезирующих интегрированные методы решения проблем над гетерогенным визуальным полем, и архитектура инструментального средства разработки таких систем. Гибридные интеллектуальные системы с гетерогенным визуальным полем попеременно моделируют коллективные вербально-символьные и визуально-образные рассуждения в зависимости от неопределенности ситуации принятия решений. Благодаря визуально-образным рассуждениям система «видит» приближенное решение проблемы, которое впоследствии может быть уточнено методами вербально-символьных рассуждений.

Ключевые слова: гибридная интеллектуальная система; гетерогенное визуальное поле; визуальное мышление; визуальное управление

DOI: 10.14357/08696527170407

1 Введение

Исследования гибридизации в искусственном интеллекте следуют социальной М. Минского и системной В. Б. Тарасова парадигмам, исходящим из того факта, что отдельно взятая технология искусственного интеллекта обладает как преимуществами, так и недостатками и только в продуманной комбинации методов и моделей могут возникнуть эмерджентность и синергетический эффект, когда дополнительность и сотрудничество сведут к минимуму частные недостатки автоматизированного решения сложных задач обработки информации и управления.

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

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

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

Развитием терминологии, теории, методологии и технологии гибридных и синергетических систем занимались У. Уитсенхаусен, Н. П. Бусленко, Л. Тавернини, А. Нерод, У. Кон, М. Д. Леммон, А. Бэк, Р. У. Брокетт, А. Пурай, П. Варайя, Дж. Уолш. На рубеже XX и XXI вв. знания изучены, обобщены и опубликованы в работах А. Н. Борисова, В. Н. Вагина, А. В. Гаврилова, А. П. Еремеева, И. А. Кирикова, А. В. Колесникова, Г. С. Осипова, Д. А. Пospelova, Г. В. Рыбиной, В. Б. Тарасова, И. Б. Фоминых, Н. Г. Ярушкиной, С. Гунэтилэйка, С. Кхеббала, Л. Медскера.

Существенный недостаток ГиИС — моделирование преимущественно логического мышления и абстрактных последовательностей цепочек символов семантических и прагматических представлений. Несмотря на развитость вербальных коммуникаций, они занимают в человеческом общении не более 10% [1]. Эксперты обмениваются визуальной информацией в рисунках, схемах, диаграммах, что ускоряет построение общего, интегрированного решения, позволяя участникам обсуждения «увидеть решение». Визуальное мышление, работа с представлениями мира как картинки эффективнее логического мышления и представлений мира как текста [2–4]. Актуально визуальное мышление и в виртуальных гетерогенных коллективах (ВГК) [5], когда реальные эксперты и искусственные элементы-аватары в едином коллективе взаимодействуют на одном понятном языке. Для ВГК визуального управления предлагается разработать новый класс интеллектуальных систем — функциональные ГиИС (ФГиИС) с гетерогенным визуальным полем, способные динамически конструировать над ним метод решения сложных задач, бесшовно комбинируя символико-логические и визуально-образные методы рассуждений.

2 Интеграция знаний в гибридных интеллектуальных системах

Гибридные интеллектуальные системы были анонсированы в 1994–1995 гг. Л. Медскером [6]. За более чем двадцатилетнюю историю развития данного направления исследований разработано множество подобных систем и их классификаций [6–13]. В статье речь идет о ФГиИС, отображающих в представлениях данных и знаний, программных средствах их поддержки состав, структуру, свойства системности, неоднородности, динамиичности и полиязыкового характера задачи-системы для моделирования в автоматизированном режиме коллективной работы над проблемными ситуациями, решения сложных задач (проблем).

В проблемно-структурной (ПС) методологии ГиИС [14] для решения сложных задач, релевантных модели «неоднородная задача», используется подход, названный в [15] «изменение представления проблемы в ходе решения»: проблема преодолевается коллективным преобразованием, реструктурированием ее презентации, в ходе которого проблема замещается субъективным аналогом — представлением (моделью) проблемной ситуации в виде осмыслинной, устойчивой мыслительной конструкции, направляющей и упорядочивающей процесс решения [16]. В рамках такой модели совмещается разнообразие объектов внешнего

мира: ресурсов, явлений и времени — и объектов внутреннего мира: целей, задач, решений, планов, оценок, возможностей, гипотез, эмоций, убеждений, ценностей, красоты и фантазии, — составляющих проблемную ситуацию, в ней акцентируются одни аспекты и отфильтровываются другие. Во внутреннем мире экспертов представление проблемы как целого редуцировано в декомпозицию, систему задач (частей целого) — форму иерархии взаимоувязанных задач, предполагающих средства, инструменты и методы решения. Качество коллективного решения зависит от качества системы задач, в которую проблему удается, работая вместе, превратить, что напрямую зависит от способности понимать и эффективно взаимодействовать с другими экспертами, «качества» межличностного интеллекта экспертов и лица, принимающего решения (ЛПР), по Г. Гарднеру.

Традиционно над проблемами работают в горизонтальных структурах «ЛПР–эксперты». Их работу условно можно разбить на несколько этапов.

Первый — редукция проблемы в декомпозицию по функциональному признаку для отображения областей однородных параметров и формулирования (постановки) в этих областях одноаспектных задач (удовлетворяющих модели «однородная задача» [14]), а также отношений на множестве задач, т. е. конструирование ментального коллективного образа — системы обслуживающих проблему задач [15]. Следствие редукции — распределение, закрепление задач за приглашенными экспертами, что применительно к автоматизированному решению проблемы по ПС-методологии может рассматриваться как выбор средства, метода решения задачи, включенной в декомпозицию. Завершается первый этап созданием варианта декомпозиции проблемы, символизирующего достижение коллективом совместного понимания проблемы, которое позже может изменяться.

Второй этап — координируемая ЛПР работа экспертов над частями проблемы — задачами. В соответствии с взглядами Дж. Брунера и Г. Гарднера, есть три основные формы представления реальности человеком: действие (двигательные задачи и телесно-кинетический интеллект, способность манипулировать физическими объектами и использовать физиологические навыки, «голосовать ногами» — *лат. pedibus in sententiam ire*), образ (графические, образные задачи, пространственный интеллект, способность мыслить в трех измерениях, легко понимать, выполнять и общаться рисунками и схемами, «видеть решения», инсайт) и знак (верbalные задачи, лингвистический интеллект, способность интерпретировать мысли в понятные всем слова и логико-математический интеллект: счет, анализ, цепочки логических умозаключений, поиск «логичных решений»). На этом этапе важно, чтобы коллектив мыслил дивергентно. Применительно к автоматизированному решению проблемы по ПС-методологии содержание этапа соответствует формированию неоднородного (гетерогенного) модельного поля (ГМП), релевантного разнообразию знаний и интеллекта экспертов для решения задач из состава декомпозиции проблемы.

Третий этап — оценка результатов решения задач экспертами и синтезирующая, агрегирующая, интегрирующая деятельность ЛПР по общему для коллек-

тива решению проблемы. Качество этой деятельности определяется способностью ЛПР к конвергентному мышлению. Рассмотрение совместно дополняющих друг друга результатов каждой линии рассуждений экспертов — ключевое условие возникновения синергетических эффектов в коллективе, когда общее мнение лучше любого частного, одноаспектного результата эксперта. Применительно к решению проблемы по ПС-методологии содержание этапа соответствует синтезу интегрированного метода решения проблемы, представленного архитектурой ФГиИС над ГМП. Этот метод существует только на время работы ФГиИС и релевантен сложившейся на текущий момент проблемной ситуации. Иными словами, вариант декомпозиции проблемы алгоритмически трансформируется в символическую структуру — знак ФГиИС, компьютерная интерпретация которого на некотором информационном языке дает ответ-консультацию, как преодолеть проблему. В знаке ФГиИС отношения из декомпозиции заменены на отношения интеграции знаний экспертов.

Очевидно, для решения проблемы коллективу понадобится более одного последовательного выполнения трехэтапных действий по гибридизации «редукция—дивергенция—конвергенция» до достижения желаемого качества обслуживающей проблему системы задач.

Выполняя гибридизацию по ПС-методологии, разработчики следуют рассмотренной схеме решения проблемы коллективом и имеют дело с тремя основными субъективными сущностями внутреннего мира: моделью проблемы (объектом-оригиналом), моделями нескольких методов решения задач (объектами-прототипами), моделью ФГиИС (объектом-результатом). Первые два объекта — источники информации для гибридизации, а последний — основа направленного формообразования, изначально программирующая то, что должно появиться в результате трансформации информации.

Объекты-прототипы имеют сильные и слабые стороны, наследуемые моделями решения задач-элементов. Методы (модели) должны быть так скомбинированы в объекте-результате, чтобы добиться резонансного, синергетического усиления возможностей элементов (частей, знаков) ФГиИС по решению задач. Проблемно-структурная методология использует две модели объектов-прототипов: макроуровневую запись свойствами и микроуровневое представление метода как составного объекта, что позволяет управлять гибридизацией по мере накопления разработчиком опыта решения однородных задач из декомпозиции проблемы.

Объекты-результаты, знаки ФГиИС специфицированы в ПС-методологии через составные части-элементы, комбинируемые отношениями интеграции [11], а также свойствами «вход», «выход», «состояние» и «гибридная стратегия». Отсюда знак ФГиИС повторяет, наследует функциональную структуру объекта-оригинала, проблемы, чем и определяется специфика данного класса ГиИС. В этой связи актуален визуальный образ проблемы, чтобы, прежде всего, разработчики ФГиИС «увидели» ее внутреннюю структуру, взаимосвязи частей — обслуживающих задач, что позволит визуально моде-

лировать объекты внутреннего мира человека в целях визуального управления.

Одна из основных проблем ФГиИС — отсутствие инструментальных средств, поддерживающих их разработку в соответствии с ПС-методологией.

3 Инструментальное средство синтеза функциональных гибридных интеллектуальных систем

Основные возможности создаваемого инструментального средства типичны для средств разработки программного обеспечения: проектирование состава и структуры системы, в данном случае — знака ФГиИС в соответствии с ПС-методологией [11], разработка ее программного кода, отладка и тестирование. Инструментальное средство создается как расширение среды MS Visual Studio, что позволяет, разработав дополнительные визуальные средства проектирования ФГиИС, автоматически генерировать большую часть программного кода, общего для любой ФГиИС. Уникальный код создается штатными средствами MS Visual Studio на любом из языков многоязыковой среды разработки приложений Common Language Runtime. Визуализация проектирования ФГиИС сократит трудозатраты, улучшит ее восприятие разработчиками, позволит вовлечь в работу экспертов из предметной области, не обладающих навыками программирования, а коллективу разработчиков — сосредоточиться на составе и структуре системы, а не на написании программного кода.

Проектирование ФГиИС по ПС-методологии — сложный процесс кол lectивного моделирования объекта-оригинала, объектов-прототипов и объекта-результата. Укрупненно его можно представить следующим образом: моделирование проблемы как неоднородной задачи, т. е. ее идентификация, редукция в декомпозицию, спецификация однородных обслуживающих задач и связей между ними; конструирование метода решения проблемы, т. е. выбор методов решения задач, разработка ГМП, элементов ФГиИС и межмодельных информационных интерфейсов, выбор стратегии из таблицы гибридных стратегий; инициализация знака ФГиИС и ее настройка.

Для удовлетворения перечисленных требований инструментальное средство синтеза ФГиИС реализуется в соответствии с архитектурой, представленной на рис. 1, где выделены четыре блока подсистем, обведенных штриховыми линиями: моделирование проблемы, моделирование метода, визуализация и организация экспериментов.

Блок моделирования проблемы предназначен для разработки описания модели предметной области, проблемы, ее задач и связей между ними. В него входят подсистемы идентификации проблемы, ее редукции и спецификации однородных задач. В подсистеме идентификации проблемы по схеме ролевых концептуальных моделей [11] определяются цель, исходные данные для решения, идентификатор и спецификатор. В подсистеме редукции проблемы продолжают-

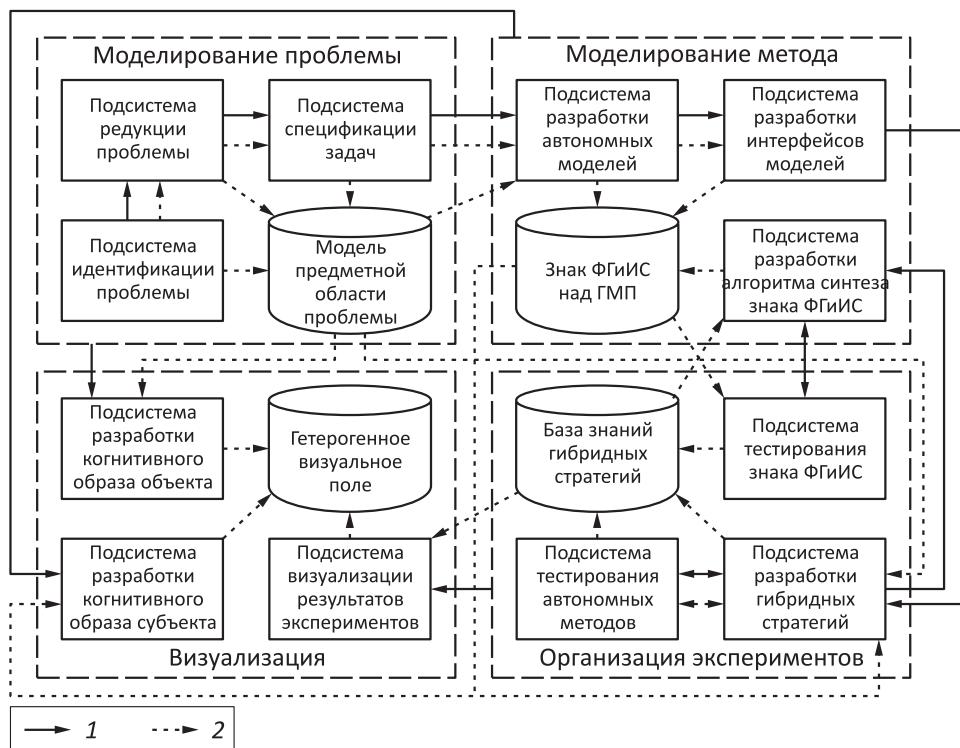


Рис. 1 Архитектура инструментального средства синтеза ФГИС с гетерогенным визуальным полем: 1 — отношение следования; 2 — отношение передачи информации

ся работы по ее системному анализу, но акценты при этом смешаются на состав и структуру. Исходная проблема редуцируется разработчиками в вариант системы обслуживающих однородных задач (декомпозиции), представляется на языке схематизированных изображений с последующим автоматическим переводом на язык OWL. Подсистема спецификации задач предназначена для идентификации однородных задач по схеме ролевых концептуальных моделей [11]. Определяются цель, исходные данные, классификатор, спецификатор, а также предварительно выбираются методы решения задач. По спецификации задач проверяется неоднородность, чтобы повысить у модельера степень уверенности в том, что проблема удовлетворяет модели «неоднородная задача» [11]. Это оправдывает дальнейшие работы по гибридизации и синтезу метода решения проблемы. Результат работы коллектива разработчиков с подсистемами данного блока — модель предметной области, представленная графически-образно и вербально-символично на языке OWL, включающая макромодель проблемы, множество ее декомпозиций (может быть, и одноэлементное) и модели однородных обслуживающих задач.

Блок моделирования метода предназначен для конструирования интегрированного метода решения проблемы — знака ФГиИС — и знаков элементов ФГиИС и включает подсистемы разработки автономных моделей, их интерфейсов и алгоритма синтеза знака ФГиИС. Подсистема разработки автономных моделей предназначена для моделирования элементов ФГиИС и создания их программного кода для решения однородных задач из декомпозиции проблемы. Элементы включаются в ГМП наряду с созданными ранее моделями. Работы этого этапа должны соответствовать методологиям автономного моделирования, быть итерационны, а качество ГМП зависит от опыта использования базисных математических и эвристических средств и инструментария. Интерфейсы автономных моделей преодолевают различия языков описания в схемах ролевых концептуальных моделей базисных методов и устанавливают отношения интеграции на элементах ГМП. Подсистема разработки алгоритма синтеза поддерживает конструирование алгоритма инициализации ФГиИС, порядка выбора стратегии из базы знаний гибридных стратегий, разрабатываемых в блоке организации экспериментов, и непосредственно генерацию знака ФГиИС по выбранной стратегии, интерпретация которого рассматривается как метод решения проблемы. Результат работы — ГМП и интегрированный метод решения проблемы, построенный над ним, релевантный сложившейся на текущий момент времени проблемной ситуации.

В блоке организации экспериментов тестируется ГМП и интегрированный метод, оценивается их эффективность, после чего результаты передаются в блок моделирования метода. В подсистеме разработки гибридных стратегий разработчики заменяют отношения декомпозиции между задачами на отношения интеграции и устанавливают отношения соответствия между исходными данными и целями проблемы, а также исходными данными и целями однородных задач соответственно. Работы заканчиваются построением таблицы гибридных стратегий, отображающей перечисленные выше связи между однородными задачами. Знания для таблицы могут быть получены в результате тестирования автономных методов и их комбинаций с использованием соответствующей подсистемы. Оценки каждого метода и каждой комбинации методов, полученные при использовании подсистемы тестирования автономных методов, вместе с таблицей гибридных стратегий заносятся в базу знаний гибридных стратегий, которая впоследствии используется для синтеза интегрированного метода решения проблемы. Разработка этого алгоритма выполняется в соответствующей подсистеме блока моделирования метода, после чего в подсистеме тестирования знака ФГиИС может быть получена его оценка, которая вместе с самим знаком заносится в базу знаний гибридных стратегий. Если оценка не устраивает разработчика, начинается итерационный процесс корректировки алгоритма синтеза и его оценки, что показано на рис. 1 двунаправленной стрелкой. Полученный алгоритм синтеза встраивается в элемент, моделирующий работу ЛПР, для учета динамического характера проблем и синтеза знака ФГиИС, релевантного проблеме на момент ее решения.

Порядок работы подсистем указан на рис. 1 сплошными стрелками. В случае обнаружения ошибок или неточности на любом из этапов возвращаются на предыдущий с корректировкой результатов его работы.

Подсистемы блока визуализации запускаются по окончании работы подсистем соответствующего им блока, что показано сплошными стрелками. Блок визуализации предназначен для визуального моделирования объектов внутреннего мира пользователей ФГиИС методами визуального управления. Он содержит три подсистемы: разработки когнитивного образа объекта, разработки когнитивного образа субъекта и визуализации результатов экспериментов. Они устанавливают соответствие между моделью предметной области, интегрированным методом решения проблемы, результатами тестирования ГМП и интегрированного метода и их визуальными представлениями, понятными конечному пользователю. Результат визуализации — гетерогенное визуальное поле, используемое как для развития у пользователя образных представлений о проблеме, методах и результатах ее решения, так и для коммуникации визуальной информацией между элементами ФГиИС, распознающими и генерирующими визуальные образы.

Применение инструментального средства синтеза ФГиИС с гетерогенным визуальным полем автоматизирует все этапы проектирования по ПС-методологии [11]. Подсистемы данного инструментального средства, за исключением блока моделирования метода, — визуальные конструкторы, применяющие методы визуального управления для привлечения к разработке ФГиИС специалистов, не владеющих навыками программирования. Подсистемы блока моделирования метода наряду с визуальным конструированием предполагают написание программного кода и вручную.

В результате многоэтапного проектирования генерируется знак ФГиИС с гетерогенным визуальным полем. Ее архитектура релевантна структуре проблемы, для решения которой она предназначена. При этом существует набор базовых элементов, которые должны присутствовать в таких ФГиИС.

4 Типовая архитектура функциональной гибридной интеллектуальной системы с гетерогенным визуальным полем

Типовая архитектура ФГиИС с гетерогенным визуальным полем (рис. 2) состоит из интерфейсного технологического элемента, координирующего элемента, имитирующего деятельность ЛПР, функциональных элементов, моделирующих знания экспертов, технологического элемента «Рабочая область», модели предметной области в гетерогенном визуальном поле, а также множества вспомогательных технологических элементов.

Интерфейсный элемент обеспечивает взаимодействие пользователя с ФГиИС, получение от него исходных данных для решения проблемы, выдачу результатов решения, а также визуализацию модели предметной области, процесса и результата решения.

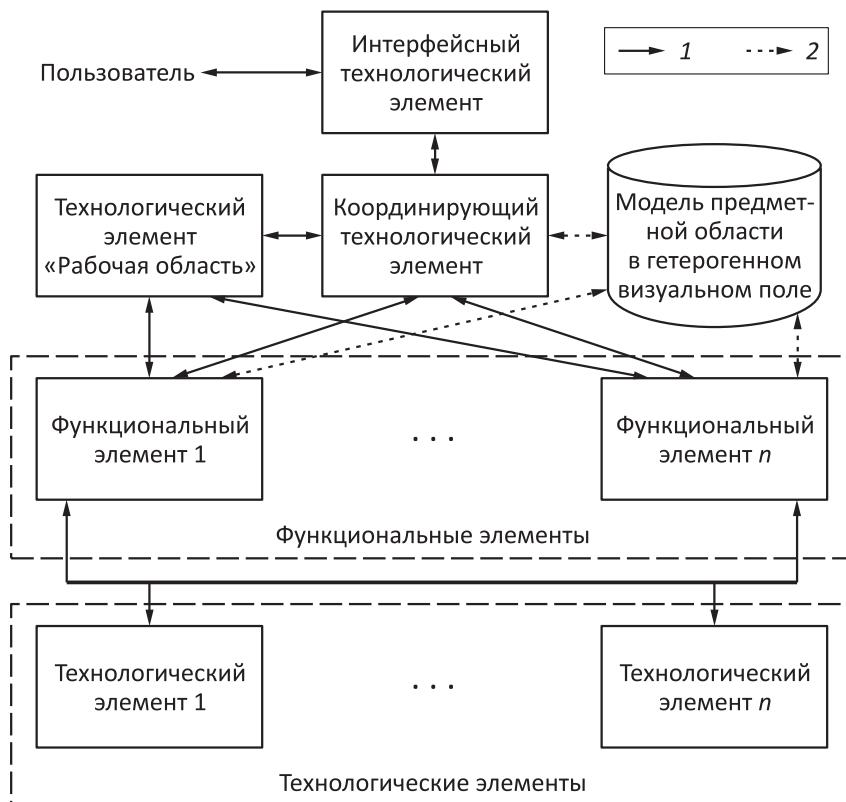


Рис. 2 Типовая архитектура ФГИС с гетерогенным визуальным полем: 1 — отношение взаимодействия элементов между собой; 2 — отношение взаимодействия элементов и модели предметной области в гетерогенном визуальном поле

Координирующий технологический элемент моделирует работу ЛПР по редукции проблемы, распределению обслуживающих задач по элементам-экспертам в соответствии с их возможностями, координации и интеграции частных решений элементов-экспертов, а также выбору релевантных автономных методов решения задач для реализации элементами в соответствии с алгоритмом синтеза ФГИС. Последний синтезирует знак ФГИС всякий раз при решении проблемы, обеспечивая релевантность метода ее изменчивым условиям и структуре. При выборе моделей учитываются не только экспертные оценки их качества и релевантности задачам, но и эффективность совместной работы, т. е. знак ФГИС синтезируется как целостная система.

Модель предметной области в гетерогенном визуальном поле — основа для синтеза знака ФГИС, позволяющая комбинировать рассуждения на вербально-символьных и визуально-образных языках, применяя тип рассуждений, реле-

вантный проблеме в сложившихся условиях, и при необходимости изменять его во время решения.

Функциональные элементы — компьютерные модели экспертных знаний, которые, в отличие от элементов классических ГиИС [14], могут обмениваться визуальной информацией. В этом случае в состав элемента ФГиИС должны быть включены модули восприятия и генерации визуальной информации. Первый распознает входящий визуальный образ. Если для моделирования рассуждений элементу требуются данные в символьном виде, визуальные образы могут быть преобразованы в них на основе семантических правил [17], иначе подсистема рассуждений продолжает работать с графическим представлением информации. Результат рассуждений поступает в модуль генерации визуальной информации, обращающийся к гетерогенному визуальному полю [17] для представления решения. Затем генерируется визуальный образ и передается другим элементам ФГиИС.

Элементы ФГиИС взаимодействуют и обмениваются информацией, в том числе визуальной, как напрямую, так и через технологический элемент «Рабочая область» — доступную всем общую область памяти, аналог «доски объявлений». Вывешивая на нее частные решения в графическом, вербально-символьном или комбинированном виде, элементы ФГиИС модифицируют изначальный вариант декомпозиции проблемы, меняют ее восприятие другими элементами, конструируют общее, интегрированное решение.

Вспомогательные технологические элементы реализуют служебные функции по управлению ФГиИС, не связанные с моделированием знаний экспертов.

Таким образом, данная архитектура ФГиИС динамически формирует интегрированную модель и метод над гетерогенными модельным и визуальным полями, имитирует сотрудничество, относительность, дополнительность для выработки консультативных решений на вербально-символьных и визуально-образных языках, а также сочетает анализ, логические, левосторонние рассуждения с конструктивным синтезом, целостным, правосторонним, визуальным мышлением, что обеспечивает релевантность процессам и явлениям коллективного интеллекта, принимающего решения в централизованном визуальном управлении [18].

5 Заключение

Предложена архитектура инструментального средства разработки ФГиИС с гетерогенным визуальным полем, а также типовая архитектура такой ФГиИС, содержащая базовый набор элементов для организации вербально-символьных и визуально-образных рассуждений. Большинство подсистем инструментального средства — конструкторы, применяющие методы визуального управления для моделирования разработчиками внутренней структуры проблемы и метода ее решения.

Реализация предложенных архитектур позволит автоматизировать проектирование ФГиИС с гетерогенным визуальным полем в соответствии с ПС-методо-

логией. Предложенная типовая архитектура ФГиИС может быть использована при разработке объекта-результата, направляющего деятельность коллектива разработчиков. Наличие в составе ФГиИС алгоритма синтеза ее знака позволяет синтезировать над гетерогенным визуальным полем релевантные методы в момент решения проблем для учета их динамического характера. Функциональная ГиИС с гетерогенным визуальным полем может применяться в ВГК визуального управления, чтобы с помощью реализованных в ней методов визуализации активировать творческое, правополушарное мышление экспертов, позволив им «увидеть» решение проблемы.

Литература

1. Каймакова М. В. Коммуникации в организации: Текст лекций. — Ульяновск: УлГТУ, 2008. 73 с.
2. Башмаков А. И., Башмаков И. А. Интеллектуальные информационные технологии. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 304 с.
3. Roam D. Unfolding the Napkin: The hands-on method for solving complex problems with simple pictures. — New York, NY, USA: Penguin Group, 2009. 320 p.
4. Mazza R. Introduction to information visualization. — London: Springer-Verlag London Limited, 2009. 139 p.
5. 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. № 3. С. 93–105.
6. Medsker L. R. Hybrid intelligent systems. — Boston, MA, USA: Springer, 1995. 298 p.
7. Hilario M. An overview of strategies for neurosymbolic integration // IJCAI Workshop on Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches Proceedings. — Montreal: McGraw-Hill, 1995. P. 234–250.
8. Sun R. Robust reasoning: Integrating rule-based and similarity-based reasoning // Artif. Intell., 1995. Vol. 75. No. 2. P. 214–295.
9. Intelligent hybrid systems / Eds. S. Goonatilake, S. Khebbal. — London: Wiley & Sons, 1995. 340 p.
10. McGarry K., Wermter S., MacIntyre J. Hybrid neural systems: From simple coupling to fully integrated neural networks // Neural Computing Surveys, 1999. Vol. 2. P. 62–93.
11. Колесников А. В., Кириков И. А. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. — М.: ИПИ РАН, 2007. 387 с.
12. Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В., Румовская С. Б., Доманицкий А. А. Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. — М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с.
13. Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В. Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. — М.: ИПИ РАН, 2014. 189 с.

14. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. — СПб.: СПбГГУ, 2001. 711 с.
15. Спиридовон В. Ф. Психология мышления: Решение задач и проблем. — М.: Генезис, 2006. 319 с.
16. Пушкин В. Н. Оперативное мышление в больших системах. — М.: Энергия, 1965. 375 с.
17. Колесников А. В., Листопад 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.
18. Колесников А. В., Листопад С. В. Визуальное управление: увидеть внешний и внутренний мир коллективного интеллекта // Системный анализ и информационные технологии: Тр. VII Междунар. конф. — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2017. С. 25–38.

Поступила в редакцию 30.09.17

ARCHITECTURE OF THE TOOL FOR DEVELOPING THE FUNCTIONAL HYBRID INTELLIGENT SYSTEMS WITH A HETEROGENEOUS VISUAL FIELD

A. V. Kolesnikov^{1,2} and S. V. 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: Hybrid intelligent systems integrating experts' knowledge models solve heterogeneous tasks (problems). At the same time, elements of hybrid intelligent systems interact using symbolic-logical models of knowledge, which significantly limit their capabilities in comparison with teams of experts who successfully argue both logically and figuratively. A typical architecture of hybrid intelligent systems that synthesize integrated methods for solving problems over a heterogeneous visual field and an architecture of the tool for developing such systems are proposed. Hybrid intelligent systems with a heterogeneous visual field alternately simulate collective verbal-symbolic and visual-figurative reasoning depending on the uncertainty of the decision-making situation. Visual-figurative reasoning allows the system to “see” an approximate solution of the problem which can be refined later by the methods of verbal-symbolic reasoning.

Keywords: hybrid intelligent system; heterogeneous visual field; visual reasoning; visual management

DOI: 10.14357/08696527170407

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16-07-00271a).

References

1. Kaymakova, M. V. 2008. *Kommunikatsii v organizatsii: Tekst lektsiy* [Communication in the organization: Lectures]. Ul'yanovsk: UIGTU. 73 p.
2. Bashmakov, A. I., and I. A. Bashmakov. 2005. *Intellektual'nye informatsionnye tekhnologii* [Intelligent informational technologies]. Moscow: BMSTU Publs. 304 p.
3. Roam, D. 2009. *Unfolding the Napkin: The hands-on method for solving complex problems with simple pictures*. New York, NY: Penguin Group. 320 p.
4. Mazza, R. 2009. *Introduction to information visualization*. London: Springer-Verlag London Limited. 139 p.
5. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, S. B. Rumovskaya, A. V. Barzenkov, and E. V. Petrenko. 2016. Kontseptual'naya model' virtual'nykh heterogenykh 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.
6. Medsker, L. R. 1995. *Hybrid intelligent systems*. Boston, MA: Springer. 298 p.
7. Hilario, M. 1995. An overview of strategies for neurosymbolic integration. *IJCAI Workshop on Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches Proceedings*. Montreal: McGraw-Hill. 234–250.
8. Sun, R. 1995. Robust reasoning: Integrating rule-based and similarity-based reasoning. *Artif. Intell.* 75(2):214–295.
9. Goonatilake, S., and S. Khebbal, eds. 1995. *Intelligent hybrid systems*. London: Wiley & Sons. 340 p.
10. McGarry, K., S. Wermter, and J. MacIntyre. 1999. Hybrid neural systems: From simple coupling to fully integrated neural networks. *Neural Computing Surveys* 2:62–93.
11. Kolesnikov, A. V., and I. A. Kirikov. 2007. *Metodologiya i tekhnologiya resheniya slozhnykh zadach metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh sistem* [Methodology and technology for solving complex problems using the methods of functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 387 p.
12. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and A. A. Domantitskiy. 2011. *Reshenie slozhnykh zadach kommivoyazhera metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh system* [Complex travelling salesman problems solved by the methods of the functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 295 p.
13. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, and S. V. Listopad. 2014. *Gibridnye intellektual'nye sistemy s samoorganizatsiei: koordinatsiya, soglasovannost', spor* [Hybrid intelligent systems with self-organization: Coordination, consistency, dispute]. Moscow: IPI RAN. 189 p.
14. Kolesnikov, A. V. 2001. *Gibridnye intellektual'nye sistemy. Teoriya i tekhnologiya razrabotki* [Hybrid intelligent systems. Theory and technology of development]. St. Petersburg: SPbGTU Publs. 711 p.

15. Spiridonov, V. F. 2006. *Psikhologiya myshleniya: reshenie zadach i problem* [Psychology of thinking: Solving tasks and problems]. Moscow: Genesis Publs. 319 p.
16. Pushkin, V. N. 1965. *Operativnoe myshlenie v bol'sikh sistemakh* [Operative thinking in large systems]. Moscow: Energy Publs. 375 p.
17. Kolesnikov, A. V., S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and V. I. Danishevskiy. 2016. Neformal'naya aksiomaticeskaya teoriya rolevykh vizual'nykh modeley [Informal axiomatic theory of the role visual models]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. App.* 10(4):114–120.
18. Kolesnikov, A. V., and S. V. Listopad. 2017. Vizual'noe upravlenie: uvidet' vneshniy i vnutrenniy mir kollektivnogo intellekta [Visual management: To see the outer and inner world of collective intelligence]. *7th Conference (International) “System Analysis and Information Technologies” Proceedings*. Moscow: FRC CSC RAS. 25–38.

Received September 30, 2017

Contributors

Kolesnikov Alexander V. (b. 1948)—Doctor of Sciences in technology; professor, Department of Telecommunications, 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 (PhD) 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

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ В ЗАДАЧАХ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

С. А. Семенов¹, Д. Л. Ревизников²

Аннотация: Использование графических процессоров (GPU) позволяет существенно расширить возможности вычислительных систем. Рассматриваются вопросы применения графических процессоров в задачах молекулярно-динамического моделирования со сложным потенциалом межчастичного взаимодействия. С целью повышения производительности вычислений на GPU реализованы следующие методы: сокращение числа запросов в глобальную память, сокращение числа ветвлений, подбор оптимальной загрузки мультипроцессоров, использование эквивалентных математических выражений для более быстрого выполнения программного кода. Параллельное выполнение программы реализуется за счет разбиения пространства моделирования на ячейки, составления и обновления списка соседних атомов с целью минимизации коллизий памяти, распределения операций по вычислительным потокам и выделения дополнительной памяти для создания копий координат взаимодействующих атомов.

Ключевые слова: высокопроизводительные вычисления; графические процессоры; разделяемая память; молекулярно-динамическое моделирование; наноматериалы

DOI: 10.14357/08696527170408

1 Введение. Методы молекулярно-динамического моделирования

В методе молекулярной динамики система рассматривается как совокупность взаимодействующих частиц (атомов, молекул, кластеров), движение которых описывается законами классической механики. Существенным является то, что он допускает распараллеливание процессов, происходящих в разных областях пространства, что позволяет эффективно применять его на многопроцессорных вычислительных системах, полностью реализуя их возможности по увеличению быстродействия и обработки больших объемов данных. Интенсивный рост производительности вычислительной техники, и прежде всего многопроцессорных

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-08-06262а).

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), greyss@mail.ru

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, reviznikov@inbox.ru

вычислительных систем, делает возможным в настоящее время эффективно моделировать структуры, состоящие из сотен миллионов структурных элементов. Данный метод предоставляет мощный теоретический инструмент для исследования свойств наноматериалов.

Молекулярно-динамическое моделирование основано на решении уравнений динамики структурных элементов (частиц) [1]:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_i = -\nabla_i E(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N), \quad (1)$$

где t — время; m_i и \mathbf{r}_i — масса и радиус-вектор i -й частицы; N — число частиц в системе; \mathbf{F}_i — сила, действующая на i -ю частицу; $\nabla_i E(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N)$ — градиент потенциальной энергии.

В настоящей работе уравнение (1) аппроксимируется конечно-разностной схемой скоростей Верле второго порядка точности [2]:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_i(t + \Delta t) &= \mathbf{r}_i(t) + \Delta t \cdot \mathbf{v}_i(t) + \frac{1}{2} \Delta t^2 a_i(t); \\ \mathbf{a}_i(t + \Delta t) &= \frac{\mathbf{F}_i}{m_i}; \\ \mathbf{v}_i(t + \Delta t) &= \mathbf{v}_i(t) + \frac{1}{2} \Delta t (\mathbf{a}_i(t) + \mathbf{a}_i(t + \Delta t)), \end{aligned}$$

где \mathbf{v}_i — скорость i -й частицы; \mathbf{a}_i — ускорение.

Предсказательной возможности простых потенциалов зачастую недостаточно для адекватного воспроизведения широкого спектра свойств молекулярных структур. Необходимо использовать потенциалы, отражающие реальные свойства межатомных связей. В качестве такого потенциала все большее распространение получает потенциал Бреннера [3], который состоит из притягивающей — $V^A(r_{ij})$ — и отталкивающей — $V^R(r_{ij})$ — компонент, а также функции порядка связи — b_{ij} :

$$\begin{aligned} E^B &= \sum_i \sum_{j>i} (V^R(r_{ij}) - b_{ij} V^A(r_{ij})) ; \quad (2) \\ V_A(r_{ij}) &= f^c(r_{ij}) \sum_{n=1,3} B_n e^{-\beta_n r_{ij}}; \\ V^R(r_{ij}) &= f^c(r_{ij}) \left(1 + \frac{O}{r_{ij}}\right) A e^{-\alpha r_{ij}}; \\ b_{ij} &= \frac{1}{2} (b_{ij}^{\sigma-\pi} + b_{ji}^{\sigma-\pi}) + \pi_{ij}^{RC} + b_{ij}^{DH}. \quad (3) \end{aligned}$$

Здесь $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ — расстояние между i -м и j -м атомами; $b_{ij}^{\sigma-\pi}$ — показатель взаимного расположения трех атомов:

$$b_{ij}^{\sigma-\pi} = \left[1 + \sum_{k \neq i,j} f_{ik}^c(r_{ik}) G_c(\cos(\theta_{ijk})) e^{\lambda_{ijk}} + P_{ij}(N_i^C, N_i^H) \right]^{-1/2}, \quad (4)$$

где $G_c(\cos(\theta_{ijk}))$ — функция угла, образованного тремя атомами; π_{ij}^{RC} — корректирующий показатель материала:

$$\pi_{ij}^{RC} = F_{ij}(N_i^l, N_j^l, N_{ij}^{\text{conj}}); \quad (5)$$

b_{ij}^{DH} — показатель взаимного расположения четырех атомов:

$$b_{ij}^{DH} = T_{ij}(N_i^l, N_j^l, N_{ij}^{\text{conj}}) \left[\sum_{k \neq i,j} \sum_{l \neq i,j} (1 - \cos^2(\Theta_{ijkl})) f_{ik}^c(r_{ik}) f_{jl}^c(r_{jl}) \right]. \quad (6)$$

В (4)–(6) $P_{ij}(N_i^C, N_i^H)$, $F_{ij}(N_i^l, N_j^l, N_{ij}^{\text{conj}})$ и $T_{ij}(N_i^l, N_j^l, N_{ij}^{\text{conj}})$ — функции, интерполирующие экспериментальные данные.

В последнее время все больший интерес вызывает распараллеливание вычислений на графических процессорах. Известен целый ряд эффективных реализаций для сравнительно простых потенциалов межчастичного взаимодействия. В этой связи отметим такие программные комплексы, как HOOMD [4], AMBER [5], LAMMPS [6–8], GROMACS [9], NAMD [10, 11], CHARMM [12], ACEMD [13], Desmond [14], Espresso [15], Folding@Home [12]. Все они используют GPU для ускорения молекулярно-динамических расчетов. В ранних работах по распараллеливанию молекулярно-динамических расчетов на GPU [16] не учитывался многочастичный характер потенциала и наличие ограничивающих функций. Реализация потенциала Брэннера на графических процессорах вызывает в настоящее время повышенный интерес [17]. Это обуславливает актуальность разработки специальных параллельных алгоритмов и программной реализации на GPU, адаптированных к специфике таких потенциалов. Данному вопросу посвящена настоящая работа.

2 Программная модель вычислений на графических процессорах

Для программирования на GPU производства NVIDIA используется технология CUDA (Compute Unified Device Architecture) [18]. Согласно архитектуре CUDA вычислительные потоки организованы в блоки.

Каждый блок имеет не менее 32 потоков. Все потоки в блоке выполняют одинаковый набор инструкций, однако ветвления внутри программы могут нарушать синхронность исполнения.

Особенностью программирования на GPU является доступ к памяти. Устройства имеют большую пропускную способность памяти, но и большую задержку при обращении по заданному адресу. Во время обращения к памяти может формироваться множество запросов. Если потоки из вычислительного блока обращаются к близким адресам памяти, то несколько запросов могут быть сгруппированы в один и выполнены параллельно. Это свойство используется для повышения эффективности вычислительного процесса в задачах молекулярной динамики.

Текстурная память имеет аппаратную поддержку интерполяции табличных данных, что позволяет эффективно вычислять значения функций $P_{ij}(N_i^C, N_i^H)$, $F_{ij}(N_i^l, N_j^l, N_{ij}^{\text{conj}})$ и $T_{ij}(N_i^l, N_j^l, N_{ij}^{\text{conj}})$, входящих в потенциал Бреннера.

Один шаг молекулярно-динамического моделирования состоит из обновления координат, скоростей, вычисления хеш-функций, сортировки, формирования списка соседних атомов, вычисления действующих на атомы сил и ускорений.

Эффективность использования программируемых графических процессоров в молекулярно-динамическом моделировании достигается за счет следующих подходов.

1. Алгоритм разбивается на шаги с одинаковыми блоками вычислений.
2. Подбираются оптимальные параметры конфигурации запуска процедур на графических процессорах.
3. Вводится хеш-функция для определения пространственной близости атомов.
4. Осуществляется сортировка массива координат атомов.
5. Потенциал взаимодействия разбивается на составные части так, чтобы каждый вычислительный поток мог выполнять независимо.

При этом для ограничения расстояний взаимодействия атомов используется функция усечения. На отсортированном массиве координат составляется список соседних атомов. Выделяется память, в которую копируются координаты соседних атомов. Вычисленные по формуле (3) коэффициенты потенциала записываются в дополнительную память. Сохраненные значения b_{ij} используются далее для расчета сил, действующих на атом.

На рис. 1 показано взаимодействие функций в рамках предлагаемого подхода [19]. Инициализация параметров и запуск вычислений на GPU выполняется центральным процессором. Все расчеты проводятся в графической памяти и на ядрах графического процессора. Данные в программном комплексе «Примус» организованы в объединенных переменных, состоящих из четырех компонентов: три пространственных составляющих и масса атома, три компонента скорости и значение температуры, три компонента ускорения и значение потенциальной

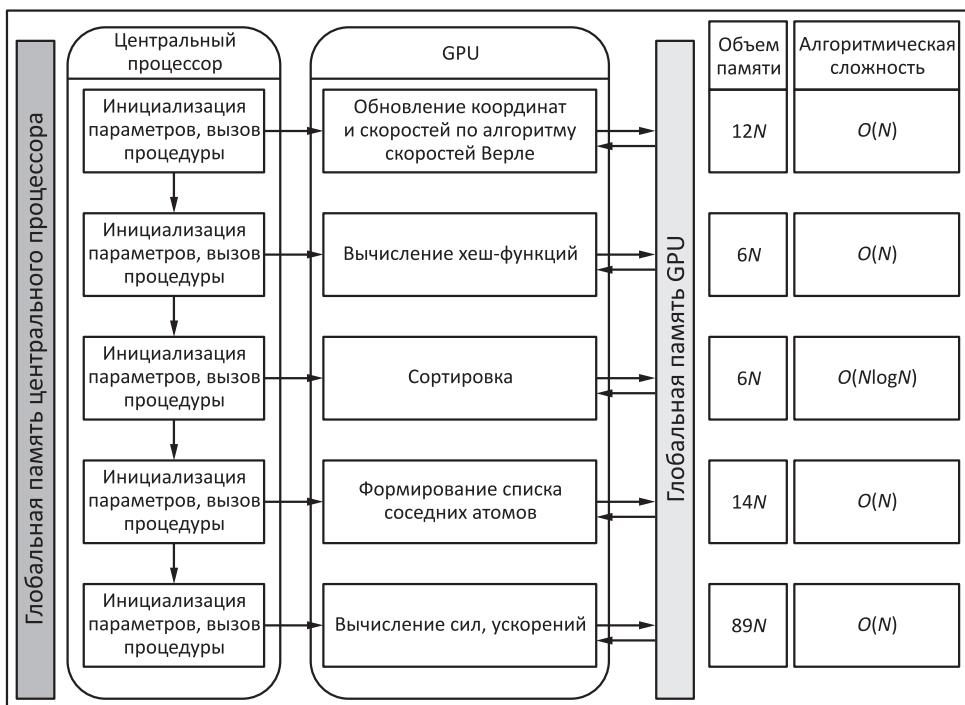


Рис. 1 Этапы молекулярно-динамического моделирования

энергии. Такая организация переменных соответствует архитектуре графических карт и совместному запросу памяти.

Как показано на рис. 1, на центральном процессоре выполняются только последовательные части и вызовы процедур, подготовка и копирование данных на устройство, задание конфигурации вычислений на GPU и его запуск.

Справа на рис. 1 показано использование памяти в процедурах, а также их вычислительная сложность.

Расчетная область описывается ячеистой моделью. За счет использования ограничивающей функции для атомов, находящихся в некоторой ячейке, можно учитывать только взаимодействие с частицами из соседних ячеек. Для определения соответствия частицы определенной ячейке используются не трехмерные координаты, а хеш-функция:

$$\text{hash}_i = z_i \text{Sy} \cdot \text{Sx} + y_i \text{Sx} + x_i ,$$

где x_i , y_i и z_i — компоненты радиус-вектора $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i(x, y, z)$ i -й частицы; Sx и Sy — число ячеек.

Основной задачей разработки алгоритма вычисления потенциала Бреннера на GPU является обеспечение наиболее эффективного доступа к памяти. В авторском программном комплексе «Примус» для этого выделяется дополнительная память и переменные, которые хранят копии координат до 8 соседних атомов. Из функции вычисления сил выносится расчет коэффициентов, так что вычислительно сложная часть операций перенесена в специальную функцию. Затратная по времени функция составления списка соседних атомов оперирует значениями хеш-функции и дополнительной памятью, после построения списка расположение координат атомов оказывается выровненным в памяти, и не возникает перекрестного доступа на следующих этапах.

Такой подход обеспечивает вычислительную сложность наиболее затратных этапов формирования списка соседних атомов и расчета атомных сил на уровне $O(N/P)$, где P — число ядер графического процессора. Более точно можно дать следующую оценку для вычислительной сложности: $(s^3 + sm)N/P$, где s — число ковалентных связей; m — число дополнительных ячеек используемой памяти. Покажем это. Согласно предлагаемому алгоритму число потоков устанавливается равным числу элементов N . При вычислениях на GPU имеет место пропорциональная зависимость затрат времени от загруженности памяти. Использование ограничивающей функции приводит к увеличению памяти в фиксированное число раз, зависящее только от s — числа ковалентных связей — и не зависящее от количества атомов в системе. Учитывая введение дополнительной памяти в количестве m ячеек, вычисления по формуле (2) с известными значениями b_{ij} потребуют smN условных единиц времени. Вычисления по формуле (3) за счет функции ограничения потребуют s^3N тактов. Общее число условных единиц времени составит $s^3N + smN$. За счет реализованных методов у каждого потока вычислений есть набор данных и инструкций, одному потоку вычислений нет необходимости ожидать, пока другой поток подготовит данные для расчета, N потоков выполняются на P процессорах, что дает сложность $(s^3 + sm)N/P$ условных единиц времени.

3 Вычислительные эксперименты

В данном разделе представлены результаты молекулярно-динамического моделирования на аппаратном обеспечении Intel Core i5-4200U, 1,6 ГГц, 2 ядра, 12 Гб RAM, nVidia GeForce 840M (384 ядра) под управлением ОС Windows 8.1. Максимальные значения числа вычислительных потоков в блоке: [1024, 1024, 64].

В качестве примера рассматривается материал графен [20], который находит все большее применение в различных отраслях современной индустрии. Моделирование позволяет подбирать необходимые размеры листов и структуру, подходящую для прикладных задач и синтезирования в лабораториях.

Для каждой функции устанавливаются независимые параметры конфигурации. Значения конфигурации соответствуют логическому представлению вы-

числительных потоков в блоке. Реализованные методы выравнивания памяти и использование объединенных переменных позволяют задавать одномерную конфигурацию блоков, что обеспечивает более простое логическое представление данных.

Общий прирост ускорения при оптимальном выборе числа вычислительных потоков достигает 17% для образца из 6720 атомов. Отмечено, что 91% времени требуется для расчета потенциала и обновления списка соседних атомов. При этом этап сортировки имеет вычислительную сложность $\alpha N \log N$, но дает незначительный вклад в общее время вычислений.

В качестве примера, позволяющего продемонстрировать методы работы с памятью, рассмотрим моделирование фуллерена. В фуллерене каждый атом имеет три соседних; таким образом, задействованы все параметры потенциала, такие как угловая функция, двугранные углы, корректирующие значения связности. В отличие от пространственно-вытянутого листа графена такая структура имеет компактное расположение атомов.

Применение хеш-функции и сортировки при условии использования 16 вычислительных потоков в блоке и 64 ячеек памяти позволило уменьшить число перекрестных запросов к памяти на 13%.

Для определения производительности программного комплекса «Примус» рассматривается актуальная задача моделирования теплопереноса в углеродных структурах. Важным элементом здесь является определение коэффициента теплопроводности. С этой целью к центру образца подводится тепловой импульс. Замеряется скорость распространения теплового импульса с течением времени. По характеру распространения и скорости определяется коэффициент теплопроводности.

В настоящей работе рассматривается лист графена типа «кресло». В течение 1000 шагов лист доводится до средней температуры 16,3 К. После стабилизации атомам по центру в полоске шириной 20 Å придается тепловой импульс 600 К. Осреднение проводится по 1000 временных шагов по области длиной 20 Å. Шаг моделирования — 1 фс. Проводится 10 000 шагов моделирования. Выдерживается микроканонический ансамбль.

Молекулярно-динамическое моделирование проводилось на аппаратном обеспечении Intel Xeon CPU E5-2650, 2,00 ГГц, 32 ядра в ОС, 128 Гб RAM, nVidia Tesla M2075 (448 ядер), nVidia Quadro 4000 (256 ядер) под управлением ОС Centos 6.2. Максимальные значения числа вычислительных потоков в блоке: [1024, 1024, 64]. В таблице показано время, необходимое компьютеру для моделирования образцов различного размера.

Представлены данные, полученные с помощью разработанного авторами программного обеспечения и с использованием известного пакета молекулярно-динамического моделирования LAMMPS.

Видно, что разработанный подход позволяет существенно повысить производительность и возможности моделирования (см. таблицу и рис. 2). Отметим,

Ускорение, достигнутое на GPU в задаче теплопереноса

Длина образца, нм	Число атомов	LAMMPS (1 ядро)		Программа авторов (Tesla M2075, 448 ядер)		Уско-рение, раз	Программа авторов (Quadro 4000, 256 ядер)	
		Время расчета, с	Затраты памяти, МБ	Время расчета, с	Затраты памяти, МБ		Время расчета, с	Затраты памяти, МБ
12,6	960	47,1	3,5	14,8	56,0	3,2	22,3	37,0
25	1920	99,9	5,5	25,6	58,0	3,9	28,9	38,0
50	3840	198,6	20,3	27,3	73,0	7,3	33,6	53,0
100	7680	407,4	134,1	37,6	72,0	10,8	58,8	54,0
200	15360	797,1	1026,9	62,8	189,0	12,0	113,0	170,0
400	30720	1661,9	1168,9	131,2	195,0	12,7	224,8	176,0
800	61440	3086,8	1230,1	276,3	207,0	11,2	524,1	188,0
1600	122880	9666,7	1389,8	524,0	1129,0	11,5	1002,4	1110,0

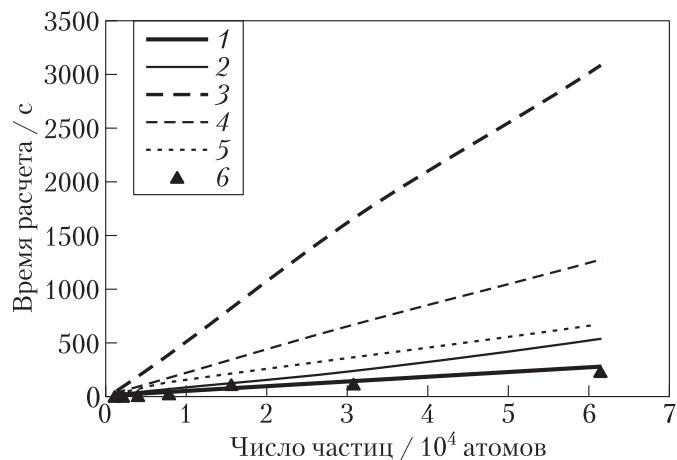


Рис. 2 Зависимость времени расчета от числа частиц: 1 и 2 — время в программах авторов (1 — Tesla M2075; 2 — Quadro 4000); 3–6 — время LAMMPS (3 — 1 ядро; 4 — 2 ядра; 5 — 4 ядра; 6 — 30 ядер)

что за счет использования памяти видеокарты процесс моделирования может отображаться на экране в режиме поступления данных.

4 Выводы

Представлена эффективная реализация молекулярно-динамического моделирования со сложным потенциалом межчастичного взаимодействия на видеокартах.

Схема скоростей Верле разбивается на две части: выполнение операций обновления координат и скоростей, вычисления сил, действующих на атомы, и ускорений. Для процедуры обновления координат подбирается максимальное число вычислительных потоков в блоке. Подбор оптимального размера элементарного блока вычислений для каждой процедуры, составляющей один этап моделирования, позволяет ускорить выполнение программы на 17%.

Доступ к памяти улучшается за счет сортировки элементов. Вычислительные потоки записывают результаты в один массив одновременно, при следующем обращении к памяти они используют весь массив необходимых значений.

Вычисление сил разбивается на два этапа: вычисление сложных коэффициентов потенциала межатомного взаимодействия с их сохранением в дополнительную память и использование готовых коэффициентов для суммирования сил со стороны всех атомов. Такой подход позволяет избежать блокирования доступа к памяти для параллельных потоков вычислений.

Литература

1. *Allen M. P., Tildesley D. J.* Computer simulation of liquids. — Oxford: Clarendon Press, 1991. 385 p.
2. *Verlet L.* Computer “experiments” on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard–Jones molecules // Phys. Rev., 1967. Vol. 159. P. 98–103. doi: 10.1103/PhysRev.159.98.
3. *Brenner D. W., Shenderova O. A., Harrison J. A.* A second-generation reactive empirical bond order (REBO) potential energy expression for hydrocarbons // J. Phys. Condens. Mat., 2002. Vol. 14. P. 783–802.
4. *Anderson J. A., Lorenz C. D., Travesset A.* General purpose molecular dynamics simulations fully implemented on graphics processing units // J. Comput. Phys., 2008. Vol. 227. No. 10. P. 5342–5359.
5. *Grand S. L., Götz A. W., Walker R. C.* SPFP: Speed without compromise—a mixed precision model for GPU accelerated molecular dynamics simulations // Comput. Phys. Commun., 2013. Vol. 184. No. 2. P. 374–380.
6. *Plimpton S.* Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics // J. Comput. Phys., 1995. Vol. 117. No. 1. P. 1–19.
7. *Brown W. M., Wang P., Plimpton S. J., Tharrington A. N.* Implementing molecular dynamics on hybrid high performance computers-short range forces // Comput. Phys. Commun., 2011. Vol. 182. No. 4. P. 898–911.
8. *Tang Y.-H., Karniadakis G. E.* Accelerating dissipative particle dynamics simulations on GPUs: Algorithms, numerics and applications // Comput. Phys. Commun., 2014. Vol. 185. No. 11. P. 2809–2822.
9. *Páll S., Hess B.* A flexible algorithm for calculating pair interactions on SIMD architectures // Comput. Phys. Commun., 2013. Vol. 184. No. 12. P. 2641–2650.
10. *Stone J. E., Phillips J. C., Freddolino P. L., Hardy D. J., Trabuco L. G., Schulten K.* Accelerating molecular modeling applications with graphics processors // J. Comput. Chem., 2007. Vol. 28. No. 16. P. 2618–2640.

11. *Phillips J., Stone J., Schulten K.* Adapting a message-driven parallel application to GPU-accelerated clusters // ACM/IEEE Conference on Supercomputing Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2008. P. 1–9.
12. *Eastman P., Friedrichs M. S., Chodera J. D., Radmer R. J., Bruns C. M., Ku J. P., Beauchamp K. A., Lane T. J., Wang L.-P., Shukla D., Tye T., Houston M., Stich T., Klein C., Shirts M. R., Pande V. S.* OpenMM 4: A reusable, extensible, hardware independent library for high performance molecular simulation // *J. Chem. Theory Comput.*, 2013. Vol. 9. No. 1 P. 461–469.
13. *Harvey M. J., Giupponi G., Fabritiis G. D.* ACEMD: Accelerating biomolecular dynamics in the microsecond time scale // *J. Chem. Theory Comput.*, 2009. Vol. 5. No. 6. P. 1632–1639.
14. *Deng H., Li X., Liu X., Wang G.* Accelerating the near non-bonded force computation in desmond with graphic processing units // 40th Conference (International) on Parallel Processing Workshops. — IEEE, 2011. P. 191–198.
15. *Roehm D., Arnold A.* Lattice Boltzmann simulations on GPUs with ESPResSo // *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2012. Vol. 210. No. 1. P. 89–100.
16. *Friedrichs M. S., Eastman P., Vaidyanathan V., Houston M., Legrand S., Bergberg A. L., Ensign A. L., Bruns C. M., Pande V. S.* Accelerating molecular dynamic simulation on graphics processing units // *J. Comput. Chem.*, 2009. Vol. 30. No. 6. P. 864–872.
17. *Tredak P., Rudnickib W. R., Majewskia J. A.* Efficient implementation of the many-body reactive bond order (REBO) potential on GPU // *J. Comput. Phys.*, 2016. Vol. 321. No. 15. P. 556–570.
18. Боресков А. В., Харламов А. А., Марковский Н. Д., Микушин Д. Н., Мортиков Е. В., Мыльцев А. А., Сахарных Н. А., Фролов В. А. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA. — М.: МГУ, 2012. 336 с.
19. Ревизников Д. Л., Семенов С. А. Особенности молекулярно-динамического моделирования наносистем на графических процессорах // Программная инженерия, 2013. № 2. С. 31–35.
20. Елецкий А. В., Искандарова И. М., Книжник А. А., Красиков Д. Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук, 2011. Т. 181. № 3. С. 233–268.

Поступила в редакцию 07.06.17

EFFECTIVE USE OF PROGRAMMABLE GRAPHICS PROCESSING UNITS IN PROBLEMS OF MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION

S. A. Semenov¹ and D. L. Reviznikov^{1,2}

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Av., Moscow 125993, 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

Abstract: Graphics processing units (GPU) make it possible to expand significantly the capabilities of computing systems. The article discusses the use of graphics processors in problems of molecular dynamics modeling with a complex particle interaction potential. In order to improve the performance of calculations on the GPU, the following methods are implemented: reduction of the number of requests to the global memory; reduction of the number of branches; selection of the optimal load of multiprocessors; and use of equivalent mathematical expressions that perform functions for faster code execution. Parallel execution of the program is realized by partitioning the space into cells, compiling and updating the list of neighboring atoms in order to minimize memory collisions, distribution of operations over computational flows, and allocation of additional memory for creating copies of the coordinates of interacting atoms. Several examples illustrating the computational complexity of the algorithms are considered.

Keywords: high-performance computing; graphics processors; shared memory; molecular dynamics simulation; nanomaterials

DOI: 10.14357/08696527170408

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-08-06262a).

References

1. Allen, M. P., and D. J. Tildesley. 1987. *Computer simulation of liquids*. Oxford: Clarendon Press. 385 p.
2. Verlet, L. 1967. Computer “experiments” on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard–Jones molecules. *Phys. Rev.* 159:98–103. doi: 10.1103/PhysRev.159.98.
3. Brenner, D. W., O. A. Shenderova, and J. A. Harrison. 2002. A second-generation reactive empirical bond order (REBO) potential energy expression for hydrocarbons. *J. Phys. Condens. Mat.* 14:783–802.

4. Anderson, J. A., C. D. Lorenz, and A. Travesset. 2008. General purpose molecular dynamics simulations fully implemented on graphics processing units. *J. Comput. Phys.* 227(10):5342–5359.
5. Grand, S. L., A. W. Götz, and R. C. Walker. 2013. SPFP: Speed without compromise — a mixed precision model for GPU accelerated molecular dynamics simulations. *Comput. Phys. Commun.* 184(2):374–380.
6. Plimpton, S. 1995. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. *J. Comput. Phys.* 117(1):1–19.
7. Brown, W. M., P. Wang, S. J. Plimpton, and A. N. Tharrington. 2011. Implementing molecular dynamics on hybrid high performance computers-short range forces. *Comput. Phys. Commun.* 182(4):898–911.
8. Tang, Y.-H., and G. E. Karniadakis. 2014. Accelerating dissipative particle dynamics simulations on GPUs: Algorithms, numerics and applications. *Comput. Phys. Commun.* 185(11):2809–2822.
9. Páll, S., and B. Hess. 2013. A flexible algorithm for calculating pair interactions on SIMD architectures. *Comput. Phys. Commun.* 184(12):2641–2650.
10. Stone, J. E., J. C. Phillips, P. L. Freddolino, D. J. Hardy, L. G. Trabuco, and K. Schulten. 2007. Accelerating molecular modeling applications with graphics processors. *J. Comput. Chem.* 28(16):2618–2640.
11. Phillips, J., J. Stone, and K. Schulten. 2008. Adapting a message-driven parallel application to GPU-accelerated clusters. *ACM/IEEE Conference on Supercomputing Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE Press. 1–9.
12. Eastman, P., M. S. Friedrichs, J. D. Chodera, R. J. Radmer, C. M. Bruns, J. P. Ku, K. A. Beauchamp, T. J. Lane, L.-P. Wang, D. Shukla, T. Tye, M. Houston, T. Stich, C. Klein, M. R. Shirts, and V. S. Pande. 2013. OpenMM 4: A reusable, extensible, hardware independent library for high performance molecular simulation. *J. Chem. Theory Comput.* 9(1):461–469.
13. Harvey, M. J., G. Giupponi, and G. D. Fabritiis. 2009. ACEMD: Accelerating biomolecular dynamics in the microsecond time scale. *J. Chem. Theory Comput.* 5(6):1632–1639.
14. Deng, H., X. Li, X. Liu, and G. Wang. 2011. Accelerating the near non-bonded force computation in desmond with graphic processing units. *40th Conference (International) on Parallel Processing Workshops*. IEEE. 191–198.
15. Roehm D., and A. Arnold. 2012. Lattice Boltzmann simulations on GPUs with ESPResSo. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 210(1):89–100.
16. Friedrichs, M. S., P. Eastman, V. Vaidyanathan, M. Houston, S. Legrand, A. L. Beberg, D. L. Ensign, C. M. Bruns, and V. S. Pande. 2009. Accelerating molecular dynamic simulation on graphics processing units. *J. Comput. Chem.* 30(6):864–872.
17. Trędak, P., W. R. Rudnickib, and J. A. Majewska. 2016. Efficient implementation of the many-body reactive bond order (REBO) potential on GPU. *J. Comput. Phys.* 321(15):556–570.
18. Boreskov, A. V., A. A. Kharlamov, N. D. Markovskiy, D. N. Mikushin, E. V. Mortikov, A. A. Myl'tsev, N. A. Sakharnykh, and V. A. Frolov. 2012. *Parallel'nye vychisleniya na GPU. Arkhitektura i programmnaya model' CUDA* [Parallel computing on GPU. Architecture and CUDA programming model]. Moscow: MSU Publs. 336 p.

19. Reviznikov, D. L., and S. A. Semenov. 2013. Osobennosti molekulyarno-dinamicheskogo modelirovaniya nanosistem na graficheskikh processorakh [Peculiarities of molecular dynamic modeling of nanostructures on graphical processors]. *Programmnaya inzheneriya* [Software Engineering] 2:31–35.
20. Eletskii, A. V., I. M. Iskandarova, A. A. Knizhnik, and D. N. Krasikov. 2011. Graphene: Fabrication methods and thermophysical properties. *Phys. Usp.* 54(3):227–258.

Received June 7, 2017

Contributors

Semenov Sergey A. (b. 1986) — engineer, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Av., Moscow 125993, Russian Federation; greyss@mai.ru

Reviznikov Dmitry L. (b. 1961) — Doctor of Sciences in physics and mathematics, professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Av., Moscow 125993, Russian Federation; leading 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; reviznikov@inbox.ru

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОДУКТА СРЕДСТВАМИ СЕГМЕНТИРОВАННОГО СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА

А. А. Зацаринный¹, В. И. Королёв²

Аннотация: Ситуационный центр (СЦ) представлен как объект в защищеннем исполнении, информационная безопасность которого обеспечивается сегментированием ресурсов по признаку выделения контуров безопасности информационно-технологической (ИТ) инфраструктуры. Рассмотрены вопросы интегрирования и консолидации информационных ресурсов (ИР) СЦ для создания информационно-аналитического продукта (ИАП). Дано представление ИТ-ландшафта СЦ в защищенном исполнении. Предложен алгоритм информационного обеспечения при создании ИАП ситуационного управления в ИТ-инфраструктуре с выделенными контурами безопасности.

Ключевые слова: ситуационный центр; информационная безопасность; информационные ресурсы; информационно-технологическая инфраструктура; информационно-аналитический продукт

DOI: 10.14357/08696527170409

1 Особенности ситуационного центра как системы в защищенном исполнении

Ситуационный центр как самостоятельный *объект информационной индустрии* — сложная автоматизированная система (АС), которая является частью системы управления объектом (организация / предприятие как объект управления — далее организационная система) и представляет собой, по существу, подсистему информационно-аналитической и технологической поддержки принятия решений в составе организационной системы. Ситуационный центр концентрирует информацию об объекте управления из различных источников *информационно-технологического пространства* объекта, обеспечивает ситуационное управление объектом и принятие управленческих решений с широким использованием *информационных технологий*, моделей и методов ситуационного анализа [1, 2].

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

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ; Финансовый университет при Правительстве РФ, vkorolev@ipiran.ru

Базовой реализацией функцией СЦ является формирование и ведение ИР. Контент ИР СЦ, как правило, является разнородным: тексты, изображения (графика), аудио- и видеофайлы, цифровые данные и т. д. При этом одним из главных характеристических факторов является необходимость отнесения этих видов разнородной информации к различной категории доступа (информация ограниченного доступа [3]) и, как следствие, обеспечение соответствующих «публичных, гражданских и иных правовых отношений».

Одним из доверенных механизмов защиты ИР СЦ с большими объемами разнородной поступающей информации является *сегментирование защищаемых ресурсов* (информационных, телекоммуникационной и программно-технической среды) по признаку выделения контуров безопасности ИТ-инфраструктуры в соответствии с категорией обрабатываемой информации. Этот вариант архитектурного построения ИТ-инфраструктуры СЦ достаточно подробно рассмотрен авторами в работе [3].

Архитектура построения ИТ-инфраструктуры СЦ в защищенном исполнении с выделением контуров безопасности имеет как преимущества, так и недостатки. В данной работе авторы рассматривают *технологические аспекты* функциональной реализации задач СЦ с такой организацией ИР.

Общий подход к архитектуре сегментирования защищаемых ресурсов СЦ может быть охарактеризован следующими основными положениями [3].

Создаются ИТ контуры безопасности: секретный «С», конфиденциальный «К» и открытый (публичный) «О». Это обеспечивает баланс требований открытости информации и ее защиты.

Каждый контур безопасности является локальной системой на базе локальной вычислительной сети (ЛВС), в которой вся информация накапливается в своем банке данных (БД) и обрабатывается в соответствии с требованиями наивысшей категории.

Интеграция информации, получение консолидированного ИАП из ИР всех сегментов обеспечиваются односторонними каналами информационных потоков через шлюзы по вектору: контур «О» → контур «К» → контур «С».

Для всего сообщества пользователей СЦ выделение контуров безопасности автоматически обеспечивает реализацию мандатной модели разграничения доступа к ресурсам. Внутри контуров возможно дифференцирование разграничения доступа по дискреционной модели. На СЦ выделяется привилегированная группа пользователей — аналитики, имеющие определенные права работать во всех сегментах, основная функция которых — подготовка ИАП по конкретной ситуации. Права и механизмы их доступа могут быть определены по ролевой модели разграничения доступа. Такой подход позволяет построить достаточно гибкую политику разграничения доступа на СЦ.

Вместе с тем при этом возникает непростая проблема функционально-целевой интеграции информации из всей совокупности ИР и ее консолидированного представления в соответствии с определенным сценарием при рассмотрении конкретной ситуации в бизнес-процессах управления объектом. Для разрешения

этой проблемы необходимы информационные технологии, ориентированные на подготовку ИАП по возникающим ситуациям с использованием данных из БД различных контуров СЦ, получением информации из систем и от объектов, с которыми обеспечивается информационное взаимодействие в определенных регламентах.

Под *информационно-аналитическим продуктом* будем понимать результат аналитической работы по рассмотрению ситуации, выполненной с учетом онтологии ситуации, в соответствии с целевыми установками и имеющимися аналитическими моделями и методиками на основе совокупной информации, накопленной в БД СЦ, предоставляемой СЦ в рамках определенного регламента или запрашиваемой конкретно под ситуацию. Информационно-аналитический продукт является исходной информационной платформой для формирования сценария и технологий представления данных в ходе процесса принятия решений лицами, принимающими решения (ЛПР).

Информационно-аналитический продукт является результатом процессов, определяющих сущность аналитики. К числу наиболее значимых процессов аналитической работы можно отнести следующие процессы [4, 5]:

- анализ целей управления и формулирование задачи информационно-аналитической работы;
- управление сбором информации в интересах решения управленческих задач в условиях меняющейся ситуации;
- анализ и оценивание полученной информации в контексте целей управления, выявления сущности наблюдаемых процессов и явлений;
- синтез нового знания (решение функциональных задач СЦ, интерпретация результатов, прогнозирование и т. п.), необходимого для решения задач управления;
- доведение результатов аналитической работы (нового знания) до субъекта управления (структуры или лица, принимающего решение).

2 Особенности обработки информационных ресурсов в ситуационном центре в защищенном исполнении

Работа с ИР в СЦ имеет свою специфику, которая прежде всего обусловлена целевым назначением СЦ как объектом информационной индустрии, осуществляющим информационно-аналитическую поддержку управления.

Объектом управления может быть любой объект, связанный с определенным видом деятельности. *Информационно-технологическое пространство* объекта управления — совокупность ИР, информационных технологий и средств их реализации, образующих и обеспечивающих поддержку данной функциональности и живучести объекта.

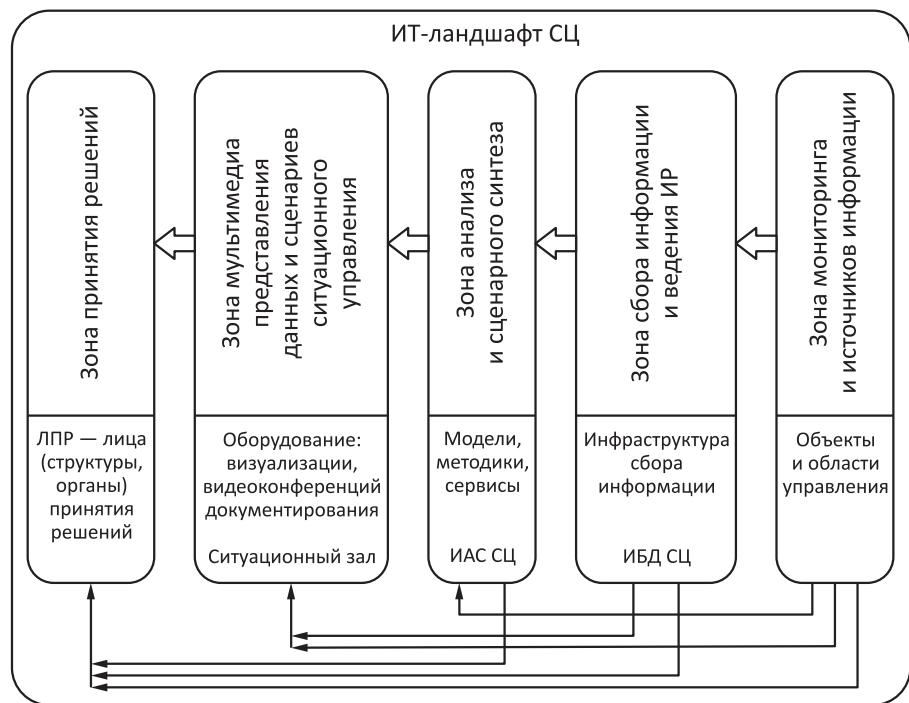


Рис. 1 Схема ИТ-ландшафта СЦ (ИАС — информационно-аналитическая система; ИБД — интегрированный БД)

Характер и технологии работы с ИР обусловливаются ИТ-ландшафтом. В общем случае ИТ-ландшафт объекта информатизации обеспечивает представление ИТ-сервисов для бизнес-процессов в сочетании с развертыванием инженерной, сетевой, вычислительной инфраструктур, систем резервного копирования и восстановления, управления и администрирования (слои ИТ-ландшафта), «накрывает» всю совокупность АС, являясь фундаментальной основой автоматизации бизнес-процессов и построения связной инфраструктуры [6].

Информационно-технологический ландшафт СЦ связан с зонами решения системных обеспечивающих задач ситуационного управления (рис. 1), с их ИТ-сервисами. На схеме ИТ-ландшафта СЦ выделены системные технологические зоны: мониторинга и источников информации, сбора информации и ведения ИР, анализа и сценарного синтеза, мультимедиа представления данных и сценариев ситуационного управления, принятия решений. Базовые информационные потоки последовательно реализуются между зонами от зоны мониторинга и источников информации (объекты и области управления) до зоны принятия решений (ЛПР — лица, структуры, органы принятия решений). Однако не исключается получение

дополнительной информации оперативного характера непосредственно в каждую из зон.

Информационно-технологические сервисы реализуются технологическими комплексами работы с ИР в зонах СЦ, конфигурация которых определяется характеристиками многих компонентов: источниками стационарной и мониторинговой информации, информационными потоками и регламентами поступления информации, базами данных и их взаимодействием в обрабатывающей и телекоммуникационной среде, функциональными задачами СЦ и аппаратом их решения, политикой информационной безопасности, другими составляющими.

Характеристики компонентов зависят прежде всего от характера самой обрабатываемой информации и от инфраструктурных решений по обработке информации.

Учитывая нормативные положения по информационной безопасности, характеристики компонентов существенно зависят от возможностей, прав и требований по распоряжению информацией. В соответствии с установленным в отечественной практике законодательством [7] распоряжение информацией субъектами, участвующими в информационных процессах, необходимо рассматривать с точки зрения прав «обладателя» информации. Отсюда следуют, по крайней мере, два аспекта отношения к используемым в СЦ ИР: ИР и информационные технологии входят непосредственно в *периметр компетенции* распоряжения объекта информатизации или они находятся *вне этого периметра*, но необходимы для управления объектом и функционирования СЦ. В последнем случае регламент предоставления этой информации и границы распоряжения определяются договорными условиями или полномочными административными решениями соответствующего уровня.

Инфраструктура обрабатывающей среды СЦ, соответствующая принятым архитектурным и техническим решениям ее построения, также влияет, а по существу, определяет технологию работы с ИР и должна отвечать требованиям политики информационной безопасности на СЦ и объекте информатизации в целом. В данном случае — архитектурные решения связаны с сегментированием ресурсов СЦ по контурам безопасности как способом обеспечения информационной безопасности [3].

В соответствии с поставленной задачей обеспечения технологического сервиса подготовки ИАП далее рассмотрим в основном процессы сбора, интеграции и предоставления информации для непосредственно выполнения аналитики и принятия решений в условиях сегментирования ресурсов СЦ по признакам контуров безопасности.

3 Алгоритм технологического процесса информационного обеспечения подготовки информационно-аналитического продукта

Сформулируем основные положения, определяющие с позиций информационной безопасности конфигурацию технологического комплекса работы с ИР

в процессах сбора, интеграции и предоставления информации для выполнения аналитики и принятия решений в условиях сегментирования ресурсов СЦ.

Вся информация поступает в СЦ по отдельным каналам, накапливается и обрабатывается в соответствии с конфиденциальностью (метка конфиденциальности — «О», «К», «С», т. е. в соответствующем контуре безопасности; контур безопасности представляет собой ЛВС).

В контурах безопасности создаются базы данных соответствующего уровня конфиденциальности.

В целях интеграции информации по релевантным признакам рассматриваемой ситуации, консолидации ее для выработки решений обеспечивается подъем информации в направлении повышения конфиденциальности.

Для всех пользователей — поставщиков информации, а также внешних пользователей, если таковые имеются, реализуется только мандатный доступ к информации с выделенных удаленных автоматизированных рабочих мест.

Пользователи-аналитики, обеспечивающие подготовку ИАП, а также определенные группы операторов, обеспечивающих в соответствии со сценариями информационное сопровождение процессов принятия решений ЛПР, наделяются правами доступа ко всем контурам безопасности по ролевой модели доступа в рамках своих функциональных обязанностей.

Схема алгоритма реализации технологического процесса информационного обеспечения для создания ИАП, соответствующего сформулированным положениям, представлена на рис. 2.

Принципиальными задачами интеграции исходной информации и эффективной ее консолидации для подготовки ИАП являются обеспечение полноты и актуальности ИР, извлеченного из ИР СЦ в соответствии с заданными показателями релевантности информации по ситуации. Для этого необходимо, по крайней мере, осуществить поиск такой информации во всех контурах безопасности. Необходимые дополнительные данные будут поступать по запросу или в соответствии с регламентами также через ЛВС и БД контуров. Данная технология отражена на схеме алгоритма.

Принципиально важным с точки зрения функциональности использования ИАП по сценарию и обеспечения при этом безопасности является технологическое решение, в какой степени интеграции представлять конечный ИАП. Возможны два варианта:

- (1) ИАП представляется как единый информационно-аналитический объект наивысшего уровня конфиденциальности и размещается в соответствующем контуре безопасности;
- (2) фрагменты ИАП определенного уровня конфиденциальности размещаются в соответствующих контурах безопасности.

Данные решения принимаются субъектом аналитики (подразделение СЦ, должностное лицо — П «А») в соответствии со сценарием информационно-аналитической поддержки принятия решения и политики информационной безопас-

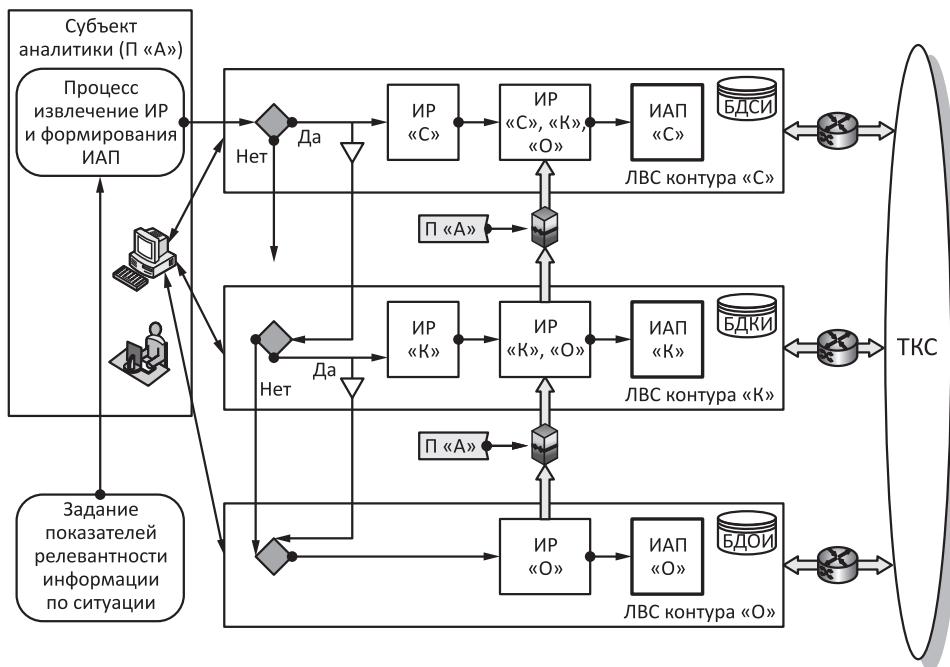


Рис. 2 Схема алгоритма информационного обеспечения при создании ИАП СЦ (ТКС — телекоммуникационная система; БДСИ, БДКИ и БДОИ — БД секретной, конфиденциальной и открытой информации)

ности. Им жедается разрешение на подъем информации по конкретной ситуации для подготовки ИАП из контуров безопасности через односторонние шлюзы.

Если ИАП представляется как единый информационно-аналитический объект наивысшего уровня конфиденциальности, то защита его осуществляется по требованиям этого наивысшего уровня конфиденциальности, но в части доступности он может рассматриваться как интегрированный объект разграничения доступа, включающий разделы различного уровня конфиденциальности. Тогда доступ к этим разделам может осуществляться по модели мандатного или ролевого доступа.

4 Заключение

Исследование технологий работы с ИР в современных компьютерных системах подтверждает очевидный вывод о том, что задачи создания информационных систем и обеспечения информационной безопасности становятся неразрывно взаимосвязанными и требуют единого системного подхода в соответствии с поло-

жениями системной инженерии и архитектурным подходом в проектировании [8]. В статье предложены методические подходы и технологические решения по обеспечению подготовки аналитического продукта при функционировании СЦ как наиболее актуального вида информационных систем, функционирование которого обеспечивается в защищенном исполнении путем сегментирования защищаемых ресурсов в рамках контуров безопасности.

Литература

1. Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. 232 с.
2. Зацаринный А. А., Королёв В. И. Информационная безопасность ситуационных центров // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 1. С. 121–138.
3. Зацаринный А. А., Королёв В. И. Сегментирование информационно-технологической инфраструктуры ситуационного центра по признаку контуров безопасности // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 136–147.
4. Демидов А. А., Захаров Ю. Н. Информационно-аналитические системы поддержки принятия решений в органах государственной власти и местного самоуправления. Основы проектирования и внедрения. — СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 100 с.
5. Сеитов А. П. Пособие по подготовке аналитических материалов (общепризнанные подходы). — Ташкент, 2013. <http://www.proza.ru/2014/02/01/796>.
6. Андреев В. Ландшафтный дизайн для информационных систем // Технологии и средства связи, 2008. № 3. С. 54–57.
7. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ с изменениями и поправками ФЗ РФ от 13 июля 2015 г. «О внесении изменений в ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.

Поступила в редакцию 07.08.17

TECHNOLOGICAL SERVICE PREPARATION OF INFORMATION AND ANALYTICAL PRODUCTS BY MEANS OF A SEGMENTED SITUATIONAL CENTER

A. A. Zatsarinny¹ and V. I. Korolev^{1,2,3}

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

²National Research Nuclear University “MEPhI,” 31 Kashirskoye Highway, Moscow 115409, Russian Federation

³Financial University under the Government of the Russian Federation, 49 Leninsky Prospekt, Moscow 125993, Russian Federation

Abstract: The situational center is presented as an object in the protected execution, where the information security is supported by segmentation of the resources on the basis of information-technology (IT) infrastructure security contour. The article considers the matters of integration and consolidation of information resources to create an information-analytical product. It provides general description of the IT-landscape of the situational center. It proposes the algorithm of information support to make the information-analytical product of situational management in IT-infrastructure with dedicated security contour.

Keywords: situational center; information security; information resources; information-technology infrastructure; information and analytical product

DOI: 10.14357/08696527170409

References

1. Zatsarinny, A. A., and A. P. Shabanov. 2015. *Tekhnologiya informatsionnoy podderzhki deyatel'nosti organizatsionnykh sistem na osnove situatsionnykh tsentrov* [A technology of information support of operations of organizational systems based on situation centers]. Moscow: TORUS PRESS. 232 p.
2. Zatsarinny, A. A., and V. I. Korolev. 2016. Informatsionnaja bezopasnost' situatsionnykh tsentrov [Information security of situation centers]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(1):121–138.
3. Zatsarinny, A. A., and V. I. Korolev. 2016. Segmentirovanie informatsionno-tehnologicheskoy infrastruktury situatsionnogo centra po priznaku konturov bezopasnosti [The segmentation of situation center informational and technological infrastructure by safety circle attribute]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):136–147.
4. Demidov, A. A., and Yu. N. Zakharov. 2012. *Informatsionno-analiticheskie sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v organakh gosudarstvennoy vlasti i mestnogo samoupravleniya. Osnovy proektirovaniya i vnedreniya* [Information and analytic systems of

- decision making support in government and local authorities. Groundwork of design and implementation]. St. Petersburg: NIU ITMO. 100 p.
5. Seitov, A. P. 2013. Posobie po podgotovke analiticheskikh materialov (obshchepriznannye podkhody) [A tutorial for analytic material preparation (universal approaches)]. Tashkent. Available at: <http://www.proza.ru/2014/02/01/796> (accessed August 15, 2017).
 6. Andreev, V. 2008. Landshaftnyy dizayn dlya informatsionnykh sistem [Landscape design for information systems]. *Tekhnologii i sredstva svyazi* [Technologies and Means of Telecommunication] 3:54–57.
 7. Federal'nyy zakon 149-FZ [Federal Law No. 149-FZ]. July 27, 2006. “Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii” s izmeneniyami i popravkami FZ RF ot 13 iyulya 2015 g. “O vnesenii izmeneniy v FZ “Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii” [On amending the Federal Law “About information, information technologies, and information protection,” including amendments and corrections of July 13, 2015].
 8. State Standard of Russia GOST R ISO 15288-2005. 2005. Sistemnaya inzheneriya. Protsessy zhiznennogo tsikla sistem [Systems engineering. Systems lifecycle processes].

Received August 7, 2017

Contributors

Zatsarinny Alexander A. (b. 1951) — Doctor of Science in technology, professor, Deputy Director, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; AZatsarinny@ipiran.ru

Korolev Vadim I. (b. 1943) — 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; professor, National Research Nuclear University “MEPhI,” 31 Kashirskoye Highway, Moscow 115409, Russian Federation; professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, 49 Leningrad Prospekt, Moscow 125993; Russian Federation; VKorolev@ipiran.ru

КЛАССИФИКАЦИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА РАННИХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

А. П. Сучков¹

Аннотация: Рассматриваются проблемные вопросы создания интегрированных систем управления (ИСУ) на основе объединения существующих и перспективных разнородных автоматизированных систем управления (АСУ). Большое количество и разнообразие интегрируемых систем увеличивает опасность реализации угроз в отношении создаваемых ИСУ на ранних стадиях их жизненного цикла (ЖЦ). Актуальным представляется выявление и анализ потенциальных уязвимостей в рамках осуществления указанных процессов. Систематизация угроз и уязвимостей на основе их грамотной классификации позволит получить полную и цельную картину складывающейся обстановки в большом объеме запланированных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). В данной статье предпринята попытка создания такой классификации.

Ключевые слова: интегрированная система управления; стадии жизненного цикла; угрозы; уязвимость; классификация

DOI: 10.14357/08696527170410

1 Введение

Создание ИСУ является веянием времени, так как наработанный комплекс разнообразных и разнородных АСУ в различных доменах инфраструктуры общества, а также внутри отдельных отраслей народного хозяйства, являясь во многом разрозненным конгломератом автоматизированных информационных систем (АИС), требует интеграции, что должно позволить получить новое качество в информатизации общества.

Более того, возросла актуальность задач информационного взаимодействия различных организационных систем между собой на основе единых регламентов взаимодействия. Такие задачи поставлены в рамках создания Системы распределенных ситуационных центров [1].

Большое количество интегрируемых систем обостряет ситуацию с возможной реализацией угроз в отношении создаваемых ИСУ на ранних стадиях их ЖЦ.

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

Актуальным представляется выявление и анализ потенциальных уязвимостей в рамках осуществления указанных процессов. Систематизация угроз и уязвимостей на основе их грамотной классификации позволит получить полную и цельную картину складывающейся обстановки в большом объеме запланированных НИОКР. В данной статье предпринята попытка создания такой классификации.

2 Критерии классификации уязвимостей

Уязвимость — свойство рассматриваемой системы — объекта угрозы, в данном случае ИСУ, терять способность к выполнению своих функций в результате негативных воздействий. Уязвимости неразрывно связаны с угрозами, так как уязвимости выявляются лишь при анализе либо реализованных угроз, либо потенциально возможных угроз (последнее, очевидно, предпочтительнее). Для анализа необходимо иметь адекватную модель структуры угроз, позволяющую учесть влияние отдельных компонентов угрозы на уязвимости в процессе развития угрозы.

Если рассматривать угрозу как сложную динамическую систему [2], то в общем виде она в каждый момент своего существования характеризуется рядом базовых сущностей: **объект угрозы** (чаще всего точкой негативного воздействия является некоторая **уязвимость** объекта угрозы — существующая или потенциальная); **субъект угрозы** (организационная система, включающая организованные или неорганизованные группы людей, обладающие ресурсами для создания предпосылок и для реализации угрозы); **средства и способы реализации угрозы** (технологии и материальные ресурсы для реализации угрозы); **ущерб объекту угрозы** (реальный или возможный); **силы и средства нейтрализации угрозы**.

Негативные воздействия на уязвимости ИСУ на всех стадиях ЖЦ могут оказывать как внешние, так и внутренние факторы. На рис. 1 (адаптированное представление ГОСТ Р ИСО/МЭК15408-2002 для приведенной структуры угроз) проиллюстрировано влияние внешних и внутренних источников угроз на уязвимости, риски и ущерб объекта угрозы.

Таким образом, в качестве **первого критерия** классификации уязвимостей можно выделить негативное воздействие внешних и внутренних факторов.

Второй критерий классификации уязвимостей определяет разделение их по стадиям и процессам ЖЦ. В соответствии с ГОСТ ИСО/МЭК/ИИРЭ 24748-1 типичные стадии ЖЦ системы включают замысел, разработку, производство, применение, поддержку и выведение из эксплуатации, которые реализуются регламентированными процессами ЖЦ. Рассматривая ранние стадии ЖЦ ИСУ, отнесем к ним замысел, разработку, производство, которые включают в себя ряд процессов, подлежащих анализу с точки зрения выявления уязвимостей.

Третий критерий подразделяет уязвимости на общие для всех АСУ и частные уязвимости для ИСУ. Так как ИСУ является частным случаем АСУ, то она подвержена тем же угрозам, рискам и уязвимостям на ранних стадиях ЖЦ, что и АСУ вообще. С другой стороны, ИСУ свойственные характерные особенности,

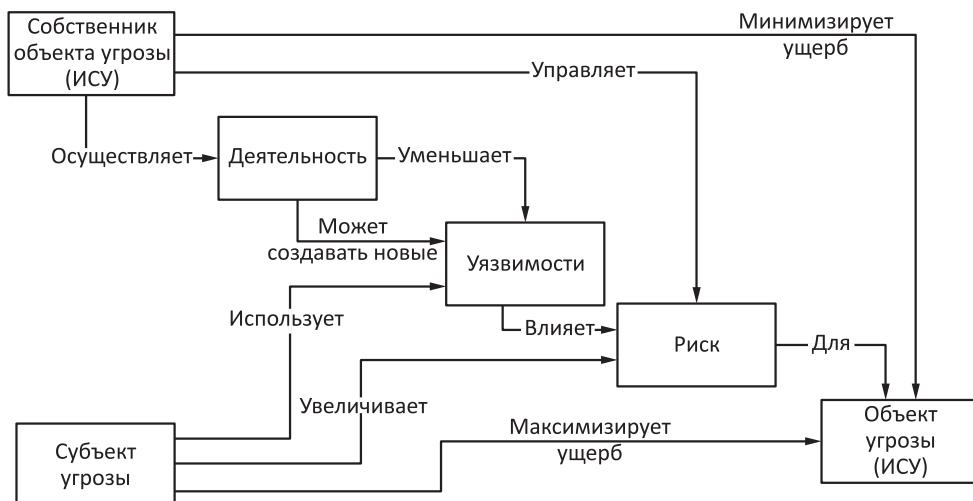


Рис. 1 Воздействие внутренних и внешних факторов на уязвимость

в основном связанные с интеграцией существующих систем управления и теми проблемами технического, информационного и организационного взаимодействия разнородных и, зачастую, принадлежащих различным организационным системам АИС, АСУ и т. п.

Четвертый критерий обеспечивает дифференциацию уязвимостей по степени опасности их возможного воздействия на ИСУ и позволяет выделить из большого множества существующих уязвимостей наиболее существенные. Можно выделить три степени опасности угроз: высокая, средняя и умеренная. Высокая опасность: уязвимости, угрожающие существованию системы, уязвимости на стадии замысла системы, функционально критичные для системы уязвимости. Средняя опасность — уязвимости, устранимые выделением дополнительных ресурсов. Умеренная опасность — уязвимости, устранимые организационными мерами.

3 Классификатор уязвимостей интегрированных систем управления

Классификатор сформирован на основе приведенных выше критериев и положений ГОСТ ИСО/МЭК/ИИРЭ 24748 и сведен в единую таблицу.

Основные уязвимости на **стадии замысла** ИСУ могут быть обусловлены конфликтом интересов сторон, некомпетентностью заказчика и исполнителя и коррупционной составляющей. Первое возникает в процессе формирования концепции ИСУ, при этом заказчик либо самостоятельно разрабатывает требования, либо нанимает поставщика, чтобы их сформировать. Если для формирования конкретных требований нанимается какой-либо поставщик, заказчик и выше-стоящая организация сохраняют силу согласования требований, разработанных

Классификация уязвимостей ИСУ на ранних стадиях жизненного цикла

Классификатор уязвимостей ИСУ на ранних стадиях ЖЦ

Критерии классификации	Стадии и процессы* ЖЦ	Внутренние негативные факторы		Внешние негативные факторы	
		Угрозы	Уязвимости	Угрозы	Уязвимости
Стадия замысла (процессы)					
Общие факторы для АСУ	Определение системных требований	Техническое задание — неверные требования к замыслу системы	Некомпетентность заказчика (1)**	Техническое задание — неверные требования к замыслу системы	Отсутствие независимого контроля (1)
	Определение потребностей и требований заинтересованной стороны	Несогласование требований к замыслу системы	Конфликт интересов сторон (1)	Несогласование требований к замыслу системы	Конфликт интересов одной из сторон к системе в целом (1)
	Приобретение	– Неверный выбор исполнителя – Срыв плановых показателей (сроки, финансирование)	– Коррупция (1) – Некомпетентность заказчика (1) – Некомпетентность исполнителя (1)	– Неверный выбор исполнителя – Срыв плановых показателей (сроки, финансирование)	Отсутствие независимого контроля (1)
	Верификация, валидация и приемка	Некачественная верификация, валидация и приемка	– Коррупция (1) – Некомпетентность заказчика (1) – Некомпетентность исполнителя (1)	Некачественная верификация, валидация и приемка	Отсутствие независимого контроля (1)

Продолжение таблицы на с. 136

поставщиком. Уязвимость «конфликт интересов» может привести к противоречиям по формированию и срыву согласования требований к ИСУ. Уязвимости «некомпетентность заказчика» или «коррупция», а также «отсутствие независимого контроля» могут привести к формированию или заданию неверных требований к замыслу системы, неверному выбору исполнителя, некачественной верификации, валидации и приемке концепции и замысла.

Некомпетентность исполнителя угрожает срывом плановых показателей (сроки, финансирование) и к поставке концепции и замысла ненадлежащего

Классификатор уязвимостей ИСУ на ранних стадиях ЖЦ (продолжение)

Критерии классификации	Стадии и процессы* ЖЦ	Внутренние негативные факторы		Внешние негативные факторы	
		Угрозы	Уязвимости	Угрозы	Уязвимости
Стадия замысла (процессы)					
Определение системных требований	Техническое задание — неверные требования к разрабатываемой системе	Некомпетентность заказчика (3)	Техническое задание — неверные требования к разрабатываемой системе	Отсутствие независимого контроля (3)	
Определение потребностей и требований заинтересованной стороны	Несогласование требований к разрабатываемой системе	Конфликт интересов сторон (3)	Несогласование требований к разрабатываемой системе	Конфликт интересов одной из сторон к системе в целом (3)	
Приобретение	– Неверный выбор исполнителя – Срыв плановых показателей (сроки, финансирование)	– Коррупция (3) – Некомпетентность заказчика (3) – Некомпетентность исполнителя (3)	– Неверный выбор исполнителя – Срыв плановых показателей (сроки, финансирование)	Отсутствие независимого контроля (3)	
Управление решениями	– Неверные технологические решения – Невозможность реализации требований	– Некомпетентность исполнителя (3) – Нерешенные научно-технические проблемы (2)	– Санкции – Недоступность научно-технической информации	– Технологическое отставание (2) – Научно-техническое отставание (2)	
Верификация, валидация и приемка	Некачественная верификация, валидация и приемка	– Коррупция (3) – Некомпетентность заказчика (3) – Некомпетентность исполнителя (3)	Некачественная верификация, валидация и приемка	Отсутствие независимого контроля (3)	

Окончание таблицы на с. 137

Классификация уязвимостей ИСУ на ранних стадиях жизненного цикла

Классификатор уязвимостей ИСУ на ранних стадиях ЖЦ (окончание)

Критерии классификации	Стадии и процессы* ЖЦ	Внутренние негативные факторы		Внешние негативные факторы	
		Угрозы	Уязвимости	Угрозы	Уязвимости
Стадия замысла (процессы)					
	Приобретение	– Неверный выбор исполнителя – Срыв плановых показателей (сроки, финансирование)	– Коррупция (3) – Некомпетентность заказчика (3) – Некомпетентность исполнителя (3)	– Неверный выбор исполнителя – Срыв плановых показателей (сроки, финансирование)	Отсутствие независимого контроля (3)
	Верификация, валидация и приемка	Некачественная верификация, валидация и приемка	– Коррупция (3) – Некомпетентность заказчика (3) – Некомпетентность исполнителя (3)	Некачественная верификация, валидация и приемка	Отсутствие независимого контроля (3)
Стадия разработки (процессы)					
Частные факторы для ИСУ	Управление решениями	– Невозможность информационной интеграции данных – Невозможность телекоммуникационной интеграции систем	– Отсутствие единой информационной модели данных (2) – Большие объемы неструктурированных данных (2) – Отсутствие связи, требуемого качества (2)	Невозможность интеграции систем	Технологическое отставание (2)

* Наименования и содержание процессов по ГОСТ Р ИСО/МЭК/ИИЭР 15288.

** Оценка степени опасности уязвимости: 1 — высокая; 2 — средняя; 3 — умеренная.

качества. Степень опасности уязвимостей на данной стадии ЖЦ — высокая, так как угрожает существованию системы и может привести к функционально критичным для системы недостаткам.

Основные уязвимости на **стадии разработки** ИСУ во многом совпадают со стадией замысла за следующими исключениями. В процессе управления техническими решениями может выясниться невозможность реализации важнейших функциональных требований к ИСУ в силу невозможности приобретения

зарубежных технологий, например из-за санкций, и отсутствия отечественных аналогов (реализуется уязвимость «*технологическое отставание*») или в силу существования *нерешенных научно-технических проблем*, которое может быть обусловлено или *наличием общенаучной проблемы*, или *научно-техническим отставанием*. Кроме того, на данной стадии ЖЦ ИСУ понижается степень опасности уязвимостей до средней и умеренной, так как большинство из них устраняются выделением дополнительных ресурсов или организационными мерами.

Важнейшей уязвимостью для всех стадий ЖЦ является *отсутствие независимого контроля*, не позволяющее осуществлять объективную оценку как требований к разрабатываемым системам, так и результатов работы поставщиков (исполнителей).

Основные уязвимости на **стадии производства** ИСУ обусловлены угрозами срыва плановых показателей (*некомпетентность исполнителя*) и ненадлежащей верификации, валидации и приемки (*некомпетентность заказчика и отсутствие независимого контроля*).

Частные факторы, характеризующие уязвимости для ИСУ, обусловлены необходимостью интеграции как существующих, так и перспективных систем управления и связанные с этим проблемы межведомственного и внутриведомственного взаимодействия, состояния систем и средств связи. Основные уязвимости здесь — отсутствие единой политики проектирования и разработки систем управления в части информационной совместимости, оперирование большими объемами неструктурированных данных, недостаточным охватом современными средствами защищенной связи территории страны и проблемами «последней мили». К сожалению, в настоящее время большинство разработок в области прикладной информатики в нашей стране сопровождается созданием все новых, зачастую дублирующих друг друга и несовместимых информационных моделей данных. Другая проблема, связанная с первой, — необходимость формализации больших объемов неструктурированной информации. Степень опасности этих уязвимостей средняя, так как их устранение связано с необходимостью проявления политической воли и выделения средств для создания единой информационной модели данных различных предметных областей, внедрения современных технологий обработки неструктурированной информации и создания адекватной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры.

Рассмотрим подробнее пути снижения уязвимостей, связанные с применением определенных научно-технических заделов, полученных в ФИЦ ИУ РАН.

4 Нейтрализация уязвимостей

Пути ослабления и нейтрализации уязвимостей ИСУ на ранних стадиях ЖЦ можно разбить на две группы. К первой группе относятся уязвимости, устранение которых связано с применением организационных мер. К таким уязвимостям

относятся: конфликт интересов, коррупция, некомпетентность заказчика, некомпетентность исполнителя, отсутствие независимого контроля. Ко второй группе относятся уязвимости, нейтрализация которых связана с выделением дополнительных ресурсов, например технологическое отставание и импортозамещение, решение проблем интеграции систем управления.

Первая группа уязвимостей лежит, в основном, вне сферы реализации научно-технических достижений, тогда как вторая группа охватывает широкий круг проблем, решение которых может быть осуществлено путем проведения комплекса научно-поисковых и научно-исследовательских работ на основании существующих заделов академических и отраслевых научных организаций. К таким задачам относится нейтрализация следующих уязвимостей:

- (1) отсутствие единой научно-обоснованной и узаконенной методологии формирования типовых функциональных требований на разработку замысла, проектирования и производства ИСУ и ее компонентов;
- (2) невозможность интеграции систем управления ввиду отсутствия единой модели данных ИСУ, методик ее применения и ведения;
- (3) невозможность интеграции систем управления ввиду наличия больших объемов неструктурированных данных, препятствующих реализации единых форматов обмена данными;
- (4) наличие нерешенных научно-технических проблем.

Процесс стандартизации функциональных требований к разрабатываемым для самых разнообразных и многочисленных приложений АСУ является актуальной проблемой, решение которой позволит снизить квалификационные требования к заказывающим организациям и обеспечить достаточное качество и унификацию замыслов, технических решений и производства АСУ различного назначения. Формирование функциональных требований к ИСУ должно опираться на имеющийся зарубежный и отечественный опыт создания такого рода систем с учетом того, что создалось наше явное технологическое отставание в этой области, с одной стороны, но имеется богатый научно-технический задел в области фундаментальных и научно-прикладных исследований по созданию систем управления, с другой стороны.

В [3–9] обоснована процессная пятистадийная функциональная модель обобщенной системы управления, которая апробирована в ряде приложений [10]. Суть данной модели состоит в представлении системы управления в виде пяти групп процессов, взаимодействующих с внешней средой и между собой: целеполагание, мониторинг, анализ, решение и действие. При этом, как показано на рис. 2, выход каждого процесса является входом другого, что обеспечивает непрерывность управления. Данная модель дает целостную, полнофункциональную картину процессов управления для различных приложений и поэтому может стать основой методики, ведомственного, отраслевого или государственного стандарта по формированию требований по разработке ИСУ.



Рис. 2 Функциональная модель ситуационной системы управления

Из опыта ФИЦ ИУ РАН следует, что одна из критических и трудноразрешимых проблем создания интегрированных информационных систем — обеспечение информационного взаимодействия существующих и вновь создаваемых АСУ, АИС и т. п. Отсутствие единых информационных моделей данных в различных доменах предметных областей и единой методологии их применения и ведения приводит к тому, что управляющие системы, созданные под требования конкретного заказчика, при попытке интеграции требуют доработок, иногда сравнимых по затратам на создание новой системы, что представляет существенную уязвимость ИСУ.

Основными разделами такой модели, в общем случае представляющей собой семантическую сеть, могут являться: классы сущностей, позволяющие формировать иерархические структуры (обеспечивающие наследование свойств в иерархии); сущности — внешние объекты мониторинга, внутренние объекты мониторинга, противодействующие ресурсы, элементы окружающей среды, системы команд и сигналов, информационно-лингвистическое обеспечение (классификаторы, справочники, словари терминов), система служебной документации.

Основу процесса извлечения структурированной информации из неструктурированного текста составляет определение и идентификация сущностей из

текста на естественном языке и выявление связей между этими сущностями. Как правило, такие методы анализа опираются на формализованные в том или ином виде знания о предметной области и специализированные методы обработки информации, реализованные в виде научноемкого программного обеспечения, опыт создания и практического применения которого накоплен в ФИЦ [11, 12].

Нерешенные научно-технические проблемы, являясь угрозой для реализации отдельных критичных требований к ИСУ, подразделяются на математические, информационные, технологические и технические.

Как пример, можно привести основные препятствия на пути развития АСУ военного назначения НАТО тактического звена из класса C^2 в классы C^3 и C^4 . По мнению экспертов [3, 5], таковыми являются следующие нерешенные научно-технические проблемы:

- (1) отсутствие математически корректных алгоритмов оптимизации действий подразделений на тактическом уровне ввиду вычислительной сложности процессов и огромного разнообразия применяемых способов и приемов выполнения боевых задач;
- (2) сложность извлечения, обработки и анализа данных тактической обстановки, формализуемых в виде быстро изменяющихся динамических семантических сетей большого объема;
- (3) необходимость обработки относительно большого количества данных в единицу времени, которые по своим объемам в настоящее время превышают возможности машинного обеспечения, используемого в тактическом звене управления;
- (4) сложность создания самоорганизующихся сетей связи и надежных локальных сетей (систем передачи данных) между большим числом высокомобильных объектов управления, что является комплексной технической и технологической проблемой.

Большая часть этих проблем имеет теоретическое решение [10], и существуют макетные варианты их практической реализации, которые требуют постановки соответствующих ОКР.

Литература

1. О формировании системы распределенных ситуационных центров, работающих по единому регламенту взаимодействия: Указ Президента РФ № 648 от 25.07.2013 г.
2. Сучков А. П. Информационная структура угроз национальной безопасности // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 113–124.
3. Boyd J. R. Patterns of conflict. Unpublished briefing slides, 1986.
4. Grant T. Unifying planning and control using an OODA-based architecture // SAICSIT Proceedings, 2005. Р. 111–113.
5. Ивлев А. А. Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации. — М., 2008. 64 с. http://pentagonus.ru/_d/0/23_KES.pdf.

6. Сучков А. П. Формирование системы целей для ситуационного управления // Системы и средства информатики, 2013. Т. 23. № 2. С. 171–182.
7. Сучков А. П. Принципы целеполагания в системах ситуационного анализа // Ситуационные центры — фокус кросс-отраслевых интересов: Доклад на 3-й ежегодной конф. — М., 2013.
8. Сучков А. П. Некоторые подходы к интеграции аналитических данных существующих и перспективных систем поддержки принятия решений // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 201–211.
9. Сучков А. П. Полнофункциональный процессный подход к реализации систем ситуационного управления // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 86–100.
10. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук: Основные направления исследований. <http://www.frccsc.ru/expertise>. 2015.
11. Осинов Г. С. Приобретение знаний интеллектуальными системами. — М.: Наука, 1997. 109 с.
12. Быстров И. И., Тарасов Б. В., Хорошилов А. А., Радоманов С. И. Основы применения онтологии и компьютерной лингвистики при проектировании перспективных автоматизированных информационных систем // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 4. С. 128–149.

Поступила в редакцию 07.07.17

CLASSIFICATION OF VULNERABILITIES OF INTEGRATED CONTROL SYSTEMS AT THE EARLY STAGES OF LIFE CYCLE

A. P. Suchkov

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 deals with problematic issues of creating integrated management systems by combining the existing and future heterogeneous automated control systems. It is important to identify and analyze potential vulnerabilities in the implementation of these processes. Systematization of the threats and vulnerabilities based on their proper classification will provide a complete and coherent picture of the emerging situation in a large volume of work scheduled. The article describes an attempt to create such a classification.

Keywords: integrated management system; stage of life cycle; threats; vulnerability classification

DOI: 10.14357/08696527170410

References

1. O formirovaniii sistemy raspredelenykh situatsionnykh tsentrov, rabotayushchikh po edinomu reglamentu vzaimodeystviya [On the formation of a system of distributed

- situational centers working on the same rules of interaction]. Указ Президента РФ [The decree of the President of the Russian Federation] No. 648 dated 25.07.2013.
2. Suchkov, A. P. 2017. Informatsionnaya struktura ugroz natsional'noy bezopasnosti [The information structure of national security threats]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):113–124.
 3. Boyd, J. R. 1986. Patterns of conflict. Unpublished briefing slides.
 4. Grant, T. 2005. Unifying planning and control using an OODA-based architecture. *SAICSIT Proceedings*. 111–113.
 5. Ivlev, A. A. 2008. Osnovy teorii Boyda. Napravleniya razvitiya, primeneniya i realizatsii [Fundamentals of the theory of Boyd. Directions of development, application and implementation]. 64 p. Available at: http://pentagonus.ru/_d/0/23_KES.pdf (accessed November 3, 2017).
 6. Suchkov, A. P. 2013. Formirovanie sistemy tseley dlya situatsionnogo upravleniya [The formation of the objective system to situational management], *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 23(2):171–182.
 7. Suchkov, A. P. 2013. Printsipy tselepolaganiya v sistemakh situatsionnogo analiza [The principles of goal-setting systems situation analysis]. *Doklad na konferentsii “Situatsionnye tsentry: Fokus kross-otrasлевых интересов”* [Report at the 2nd Conference “The Situational Centers: The Focus of Cross-Sectoral Interests”]. Moscow.
 8. Suchkov, A. P. 2015. Nekotorye podkhody k integratsii analiticheskikh dannykh sushchestvuyushchikh i perspektivnykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy [Some approaches to the analytical data integration of the existing and future decision support systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):201–211.
 9. Suchkov, A. P. 2017. Polnofunktional'nyy protsessnyy podkhod k realizatsii sistem situatsionnogo upravleniya [A fully functional process-based approach to the implementation of systems of situational management]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(1):86–100.
 10. Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences. 2015. Osnovnye napravleniya issledovaniy [The main directions of research]. Available at: <http://www.frccsc.ru/expertise> (accessed July, 2017).
 11. Osipov, G. S. 1997. *Priobretenie znanii intellektual'nyimi sistemami* [Knowledge acquisition intelligent systems]. Moscow: Nauka. 109 p.
 12. Bystrov, I. I., B. V. Tarasov, A. A. Khoroshilov, and S. I. Radomanov. 2015. Osnovy primeneniya ontologii i kom'yuternoy lingvistiki pri proektirovaniyu perspektivnykh avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem [The application basis of ontology and computational linguistics in the design of advanced automated information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(4):128–149.

Received July 7, 2017

Contributor

Suchkov Alexander P. (b. 1954) — Doctor of Science in technology, 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; ASuchkov@frccsc.ru

ЗАПРЕТЫ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕР В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ИНСАЙДЕРА

E. A. Мартынов¹

Аннотация: Рассматривается модель данных, с которыми работает конечное множество аналитиков. Среди аналитиков может быть инсайдер, который за счет доступа к запрещенным для него данным может нанести ущерб организации. Работа каждого аналитика описывается случайной последовательностью выборок допустимых для него данных. Обращение к запрещенным данным описывается запретами вероятностных мер, описывающих честную работу аналитиков. Предложен метод построения случайных последовательностей с заданным множеством запретов, позволяющий корректно использовать теорию запретов и однозначно идентифицировать инсайдера за конечное число наблюдений за работой аналитиков.

Ключевые слова: инсайдер; информационная безопасность; теория запретов вероятностных мер; математическая статистика

DOI: 10.14357/08696527170411

1 Введение

В работе [1] рассматривается модель статистического выявления инсайдера среди конечного множества аналитиков за счет расширения множества атрибутов информации, используемой инсайдером.

В рассмотренной модели [1] не использовались данные о содержании информации, которую получает аналитик для своей работы. Вместе с тем содержание некоторых данных может быть запрещено для доступа аналитика даже в тех атрибутах, которые для него разрешены.

В данной работе обобщается модель работы [1] введением дополнительных ограничений на доступ к содержанию определенных данных, при этом множество данных, в отличие от множества атрибутов, может расширяться. Несмотря на значительное усложнение описания возможностей инсайдера, построен класс вероятностных распределений, соответствующих работе честных аналитиков. Работа инсайдера характеризуется запретами вероятностных распределений, описывающих работу честных аналитиков. Используя результаты теории запретов вероятностных мер, в рассматриваемой обобщенной модели также удается доказать возможность выявления инсайдера.

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, zhenya388@yandex.ru

2 Использование запретов вероятностных мер для выявления инсайдера

Пусть $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ — множество атрибутов данных, собираемых в хранилище. Обозначим через \mathfrak{R} — множество всех подмножеств множества A . Функциональные обязанности аналитика U характеризуются множеством $X = \{X_1, \dots, X_k\}$, $X_i \subseteq \mathfrak{R}$. Будем считать, что подмножества из X содержат не только атрибуты, которые обычно использует аналитик U , но и возможные дополнительные атрибуты, которые могут потребоваться при решении его профессиональной задачи, и $\bigcup_{i=1}^k X_i = B \subset A$.

Данные, накапливаемые в базе данных, представляют собой множество строк, элементами которых являются значения соответствующих атрибутов. Это множество строк увеличивается в соответствии с дискретным временем, которое принимает значения во множестве натуральных чисел. Таким образом, в каждый момент времени n , $n = 1, 2, \dots$, данные для аналитиков представляют собой матрицу (таблицу) M_n . Аналитик U в каждый момент времени n , $n = 1, 2, \dots$, выбирает набор атрибутов из X и соответствующие им данные из множества $T \in \mathfrak{S}_n$, где \mathfrak{S}_n — множество всех подмножеств строк матрицы M_n .

Введенные для аналитика U ограничения по выбору атрибутов дополним ограничениями по выбору данных из матрицы M_n . Для аналитика U в каждый момент времени n может быть доступно множество подматриц Y_n матрицы M_n .

Обозначим множество всех подматриц матрицы M_n через \mathbb{N}_n , $\mathbb{N}_n = \mathfrak{R} \times \mathfrak{S}_n$. Определим декартово произведение $\mathbb{N}^n = \prod_{j=1}^n \mathbb{N}_j$, \mathbb{N}^∞ — множество последовательностей с элементами из \mathbb{N}_n .

Определим \mathcal{A} как σ -алгебру на \mathbb{N}^∞ , порожденную цилиндрическими множествами. \mathcal{A} также является борелевской σ -алгеброй в тихоновском произведении \mathbb{N}^∞ , где каждое \mathbb{N}_n имеет дискретную топологию [2, 3].

Работу аналитика можно представить в виде последовательности элементов y_n , $n = 1, 2, \dots$, множеств Y_n . Пусть для каждого n определена вероятностная мера P_n на конечном множестве \mathbb{N}^n . Будем предполагать, что для всех n и $(y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{N}^n$ меры P_n удовлетворяют соотношениям:

$$P_n(y_1, \dots, y_n) = P_{n+1}(y_1, \dots, y_n, \mathbb{N}_{n+1})$$

и $P_n(y_1, \dots, y_n) = 0$, когда $(y_1, \dots, y_n) \notin \prod_{i=1}^n Y_i$.

Тогда на пространстве $(\mathbb{N}^\infty, \mathcal{A})$ определена вероятностная мера P . При этом для любого $n = 1, 2, \dots$ вероятностное распределение P_n есть проекция меры P на первые n координат случайной последовательности из \mathbb{N}^∞ . Ясно, что для любого $C_n \subseteq \mathbb{N}^n$

$$P_n(C_n) = P(C_n \times \mathbb{N}(n)), \quad (1)$$

где $\mathbb{N}(n) = \prod_{j=n+1}^\infty \mathbb{N}_j$.

Пусть $D_n(P)$ — носитель меры P_n [3]:

$$D_n(P) = \{\bar{\omega}_n \in \aleph^n, P_n(\bar{\omega}_n) > 0\}.$$

Определим цилиндрическое множество $\Delta_n(P)$ следующим образом:

$$\Delta_n(P) = D_n(P) \times \aleph(n).$$

Последовательность цилиндрических множеств $\Delta_n(P)$, $n = 1, 2, \dots$, — не возрастающая последовательность [3], и

$$\Delta(P) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Delta_n(P) = \bigcap_{n=1}^{\infty} \Delta_n(P).$$

$\Delta(P)$ является замкнутым множеством в тихоновском произведении и является носителем меры P [3]. Для честного аналитика $\Delta(P) \subseteq \prod_{i=1}^{\infty} Y_i$.

Пусть $\bar{\omega}_s \in \aleph^s$ и $\tilde{\omega}_{s-1}$ получен из $\bar{\omega}_s$ отбрасыванием последней координаты.

Определение 1. Запретом меры P_n [4, 5] называется вектор $\bar{\omega}_s \in \aleph^s$, $s \leq n$, такой что

$$P_n \left(\bar{\omega}_s \times \prod_{j=s+1}^n \aleph_j \right) = 0.$$

Определение 2. Запрет $\bar{\omega}_s$ меры P_s является наименьшим запретом меры P [4, 5], если

$$P_{s-1}(\tilde{\omega}_{s-1}) > 0.$$

Поясним понятие запрета в рассматриваемой схеме. Для каждого n в матрице M_n определен ряд столбцов (атрибутов), являющихся запрещенными для аналитика U , и ряд подстрок (значений разрешенных для доступа атрибутов), вызов которых запрещен для аналитика U . Любой вызов данных, содержащих запрещенные атрибуты и/или значения, является нарушением информационной безопасности и определяет запрет на шаге n работы аналитика. Тогда запрет в мере P_n — это любой вектор, который в хотя бы одной координате k , $k = 1, \dots, n$, содержит запрет из соответствующей матрицы M_k .

Если $\bar{\omega}_s$ — запрет меры P_n , тогда для всех $s \leq l \leq n$ и всех последовательностей $\bar{\omega}_l$, начинающихся с последовательности $\bar{\omega}_s$, имеем:

$$P_l(\bar{\omega}_l) = 0.$$

Действительно [1], если $P_s(\bar{\omega}_s) = 0$, то из (1) следует, что

$$P(\bar{\omega}_s \times \aleph(s)) = 0$$

и

$$P \left(\bar{\omega}_s \times \prod_{j=s+1}^l \aleph_j \times \aleph(l) \right) = 0.$$

Следовательно,

$$P_l(\bar{\omega}_l) = P(\bar{\omega}_l \times \aleph(l)) \leq P \left(\bar{\omega}_s \times \prod_{j=s+1}^l \aleph_j \times \aleph(l) \right) = 0.$$

Если существует вектор $\bar{\omega} \in \aleph^n$ такой, что $P_n(\bar{\omega}) = 0$, тогда существует наименьший запрет, который определяется значениями первых координат вектора $\bar{\omega}_n$.

По определению инсайдера в любой последовательности его действий должно быть обращение к запрещенной информации. Это означает, что в любой последовательности действий инсайдера найдется хотя бы один запрет. Отсюда следует, что какова бы ни была мера Q , определяющая последовательность действий инсайдера, $\Delta(Q) \cap \prod_{i=1}^{\infty} Y_i = \emptyset$ и тем более $\Delta(Q) \cap \Delta(P) = \emptyset$, где $\Delta(Q)$ — носитель вероятностной меры Q .

Отсюда, проверяя последовательность гипотез $H_{0,n} : P_n$ против альтернатив $H_{1,n} : Q_n$, $n = 1, 2, \dots$, критериями, основанными на запретах, из работы [6] следует, что выявление инсайдера происходит на конечном шаге с вероятностью 1, при этом вероятность ложной тревоги (идентификация честного аналитика как инсайдера) равна 0.

3 Заключение

Основным результатом работы является построение множества запретов в модели поведения инсайдера, учитывающее сложные ограничения на деятельность честных аналитиков.

Для решения задачи выявления инсайдера среди множества аналитиков можно применять статистические методы, основанные на запретах. При этом запреты могут определяться не только множествами допустимых атрибутов [1], но также ограничениями на выбор данных из разрешенных атрибутов. Размер используемых данных на каждом шаге может увеличиваться.

Литература

1. Мартьянов Е. А. Возможность выявления инсайдера статистическими методами // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 41–47.
2. Бурбаки Н. Общая топология. Основные структуры / Пер. с фр. — М.: Наука, 1968. 272 с. (Bourbaki N. Topologie générale. — Paris: Hermann, 1971. 356 p.)

3. Прохоров Ю. В., Розанов Ю. А. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1993. 496 с.
4. Грушо А., Тимонина Е. Запреты в дискретных вероятностно-статистических задачах // Дискретная математика, 2011. Т. 23. Вып. 2. С. 53–58.
5. Grusho A., Timonina E. Consistent sequences of tests defined by bans // Optimization theory, decision making, and operations research applications. — Springer proceedings in mathematics & statistics ser. — New York – Heidelberg – Dordrecht – London: Springer-Verlag, 2013. Vol. 31. P. 281–291.
6. Grusho A., Grusho N., Timonina E. Quality of tests defined by bans // Stochastic and data analysis methods and applications in statistics and demography / Eds. J. R. Bozeman, T. Oliveira, Ch. H. Skiadas. — ISAST, 2016. P. 399–405.

Поступила в редакцию 15.09.17

BANS OF PROBABILITY MEASURES IN THE PROBLEM OF INSIDER DETECTION

E. A. Martyanov

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

Abstract: A data model for a common work of a finite set of analysts is considered. Among analysts, there can be an insider who due to access to forbidden data can cause damage to the organization. Operation of each analyst is described by a random series of samples of data, admissible for him. The process of addressing the forbidden data is described by bans of probability measures defining honest operation of analysts. The method of definition of the set of bans which allows to use the theory of bans correctly is constructed. It helps to identify the insider by a finite number of observations over operations of analysts.

Keywords: insider; information security; theory of bans of probability measures; mathematical statistics

DOI: 10.14357/08696527170411

References

1. Martyanov, E. A. 2017. Vozmozhnost' vyavleniya insaydera statisticheskimi metodami [Possibility of insider detection by statistical techniques]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):41–47.
2. Bourbaki, N. 1940. *Topologie générale*. Ch. 1: Structures topologiques. Ch. 2: Structures uniformes. Paris: Hermann. 356 p.
3. Prokhorov, Yu. V., and Yu. A. Rozanov. 1993. *Teoriya veroyatnostey* [Theory of probabilities]. Moscow: Nauka. 496 p.

4. Grusho, A., and E. Timonina. 2011. Prohibitions in discrete probabilistic statistical problems. *Discrete Math. Appl.* 21(3):275–281.
5. Grusho, A., and E. Timonina. 2013. Consistent sequences of tests defined by bans. *Optimization theory, decision making, and operations research applications*. Springer proceedings in mathematics & statistics ser. New York – Heidelberg – Dordrecht – London: Springer-Verlag. 31:281–291.
6. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2016. Quality of tests defined by bans. *Stochastic and data analysis methods and applications in statistics and demography*. Eds. J. R. Bozeman, T. Oliveira, and Ch. H. Skiadas. ISAST. 399–405.

Received September 15, 2017

Contributor

Martyanov Evgeny A. (b. 1991)— PhD Student, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; zhenya388@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ДИНАМИКУ КАЧЕСТВА СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕТИ

И. М. Адамович¹, О. И. Волков²

Аннотация: Статья посвящена описанию и обоснованию подхода к моделированию ошибок независимых пользователей при формировании семантической сети, лежащей в основе распределенной технологии поддержки конкретно-исторических исследований, и количественной оценке степени влияния данных ошибок на структуру сети. Предложенный подход заключается в развитии модели семантической сети, построенной с опорой на принципы графодинамики и на модель Барабаши–Альберт, за счет включения в нее механизмов параллельной фиксации ошибочных и соответствующих им безошибочных (идеальных) действий пользователей, а также механизма имитации поисковых запросов, выполняемых параллельно в искаженной и неискаженной подсетях. В рамках этого подхода также была проведена классификация ошибок, влияющих на структуру сети, и разработан интегральный показатель качества сети. С помощью данной модели были проведены экспериментальные проверки влияния ошибок пользователей на качество семантической сети в динамике.

Ключевые слова: семантическая сеть; модель; ошибки пользователей; поисковый запрос; качество сети

DOI: 10.14357/08696527170412

1 Введение

В статье [1] была описана новая распределенная технология поддержки историко-биографических исследований, для которой была обоснована форма организации информации в виде семантической сети. В статье [2] была поставлена и обоснована задача оценки качества этой семантической сети, формируемой одновременно множеством не связанных между собой исследователей. Была описана модель, с помощью которой можно в динамике изучить свойства информации, организованной в форме семантической сети. Модель строится на базе сочетания принципов графодинамики [3] с принципом предпочтительного присоединения, лежащим в основе модели Барабаши–Альберт, — алгоритмом генерации случайных безмасштабных сетей [4]. Было показано соответствие модели

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Adam@amsd.com

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Volkov@amsd.com

признакам когнитивной сети [5] и, следовательно, ее пригодность для решения поставленной задачи — изучения поведения семантической сети в динамике. Поскольку основная задача системы — обслуживание информационных запросов, для оценки качества сети модель была дополнена механизмом имитации ошибок пользователей, механизмом параллельного хранения искаженной и неискаженной информации и механизмом имитации пользовательских информационных запросов.

Целью настоящей статьи является обоснование и описание соответствующей модификации модели, выработка критерия качества сети и проведение проверок изменения поисковой доступности информации в динамике.

В данной статье используются понятия и термины в соответствии с [2].

2 Ошибки пользователей

При моделировании ошибочного поведения пользователей необходимо ограничить круг рассматриваемых ошибок. В экспериментальной психологии различают следующие виды ошибок: ошибки восприятия, ошибки памяти, ошибки мышления и ошибки внимания [6]. Ошибки памяти, мышления и внимания являются случайными, возможны при работе пользователя в любой системе и при любой ее организации и определяются исключительно психологией пользователя. Поскольку процент таких ошибок крайне мал [7], представляется целесообразным ограничиться рассмотрением только ошибок восприятия, поскольку они могут провоцироваться структурой данных.

Ошибки, влияющие на структуру данных (ОСД), — это прежде всего ошибки формирования подсети понятий. Ошибки формирования экземпляра могут привести к затруднению корректного поиска только этого экземпляра и не являются ОСД, за исключением ошибок связей типа «часть».

Помимо ОСД подлежат изучению ошибки, влияющие на формирование информационного запроса, поскольку они, как и ОСД, влияют на возможность получения информации от семантической сети.

Самая главная причина искажения структуры данных — это такое проявление ошибки восприятия, как ошибка выбора, возникающая при необходимости выбора элемента из множества однотипных. Такая ошибка может привести как к ошибочному дублированию ненайденного элемента, так и, в случае построения траектории в сети понятий, к ошибочному обрыву траектории. Вероятность ошибки выбора зависит от размера множества. Будем считать, что, когда количество элементов невелико (в пределах объема внимания V_{attn} [8]), вероятность ошибки незначительна (менее 0,0001) и может не учитываться в модели, а по мере роста числа элементов плавно приближается к некоторому предельному значению, которое может быть оценено как 0,01 [9].

Отличительной чертой ошибки выбора является наличие ее явной альтернативы. Это не так для следующей категории ошибок: ошибок иерархии понятий, формируемой с помощью логической операции деления понятий. Деление должно

проводиться по одному основанию, деление должно быть полным, последовательным и результаты деления не должны пересекаться [10]. Нарушение этих принципов (кроме требования полноты) приводит к ошибке, затрудняющей поиск информации. При этом явная альтернатива ошибочному действию отсутствует.

3 Определения и обозначения

Атрибут, имеющий под собой дерево подпонятий, будем называть Д-атрибутом, терминальный атрибут — Т-атрибутом, атрибут со связью «значение» (З-связь) — З-атрибутом. Связь типа «подпонятие» будем называть П-связью, связь типа «часть» — Ч-связью. Тип узла С обозначим как Type(C), тип связи β — как Type(β).

Узел, имеющий входящую П-связь, будем называть иерархическим. Множество иерархических узлов и корней иерархии будем обозначать как \hat{Y} . Если $A \in \hat{Y}$, то через $D(A)$ будем обозначать поддерево иерархии с корнем в A .

Связь α от узла A к узлу B будем обозначать как $\alpha(A \rightarrow B)$. Дополнительно введем новый тип связи ProtoOf, связзывающий ошибочно созданный неиерархический узел B с неиерархическим узлом A , который должен был бы использоваться вместо него, если бы ошибки не было. В этом случае будем называть узел A прототипом узла B .

У ошибочно созданного иерархического узла не может быть прототипа, поэтому дополнительно вводится связь типа ProtoTrace, которая служит для связи экземпляра Н-понятия с отдельными узлами их деревьев, которые должны были бы принадлежать экземпляру, если бы ошибки не было.

У любого объекта (узла или связи) есть атрибут Rank, принимающий значения R (реальный), I (идеальный) и RI (реальный и идеальный). Экземпляры и их связи (кроме Ч-связей) наследуют Rank из сети понятий.

Если A — Н-понятие или А-понятие, то $\text{Rank}(A) \neq I$.

Любой неиерархический узел A с $\text{Rank}(A) = R$ должен иметь связь ProtoOf со своим прототипом B : $\text{Rank}(B) \in \{I, RI\}$. Будем говорить $B = \text{Proto}(A)$. Если $\text{Rank}(A) \in \{I, RI\}$, то $A = \text{Proto}(A)$. Если $M = \{B_i\}$ — множество узлов, то под $\text{Proto}(M)$ будем понимать множество $\{\text{Proto}(B_i)\}$.

Для любого неиерархического узла A существует множество узлов

$$\{A_i : \text{Proto}(A_i) = \text{Proto}(A)\}.$$

Обозначим это множество как $\text{Gr}(A)$.

Определим операцию установления связи α ($\text{Type}(\alpha) = t \neq \text{ProtoOf}$) от неиерархического узла A к неиерархическому узлу B : $\text{Set} : \alpha(t, A \rightarrow B)$.

1. Если $\text{Rank}(A) = \text{Rank}(B) = RI$, то устанавливается $\alpha(A \rightarrow B)$, $\text{Rank}(\alpha) = RI$.

2. Если $\text{Rank}(A) = R$ или $\text{Rank}(B) = R$, то устанавливаются связи $\alpha(A \rightarrow \rightarrow B)$ и $\alpha_1(\text{Proto}(A) \rightarrow \text{Proto}(B))$, где $\text{Rank}(\alpha) = R$, $\text{Rank}(\alpha_1) = I$, $\text{Type}(\alpha_1) = \text{Type}(\alpha)$.

Аналогично определим операцию удаления связи $\text{Rem : } \alpha$.

Если $A \in \hat{Y}$ (т. е. A является узлом некоторого дерева D), то узлом бифуркации для A будем называть ближайший к нему вышележащий узел AD дерева D , удовлетворяющий одному из следующих условий:

- AD имеет исходящие Π -связи на узлы с различным Rank ;
- AD — корневой узел D и $\text{Proto}(AD) = AD_1 \neq AD$;
- AD — D -атрибут, $\text{Proto}(AD) = AD_1$ — Z -атрибут, связанный с A -понятием.

Обозначим узел бифуркации для узла A как $\text{Fork}(A)$. Совокупность всех узлов бифуркации для узлов некоторого дерева D обозначим как $\text{Fork}(D)$. Не для каждого узла D существует узел бифуркации, и в некоторых случаях $\text{Fork}(D)$ может быть пусто.

Определим узел $\text{Fork}'(A)$, сопряженный с $\text{Fork}(A)$:

- (1) если $\text{Fork}(A)$ имеет исходящие Π -связи на узлы с различным Rank , то $\text{Fork}'(A) = \text{Fork}(A)$;
- (2) если $\text{Fork}(A)$ — корневой узел D и $\text{Proto}(\text{Fork}(A)) \neq \text{Fork}(A)$, то $\text{Fork}'(A) = \text{Proto}(\text{Fork}(A))$;
- (3) если $\text{Fork}(A)$ — D -атрибут, $\text{Proto}(\text{Fork}(A))$ — Z -атрибут, связанный Z -связью с A -понятием AZ , то $\text{Fork}'(A) = AZ$.

Если $A \in \hat{Y}$, то обозначим как $D_I(A)$ поддерево из всех нижележащих для узла A узлов, имеющих $\text{Rank} = RI$ ($\text{Rank} I$ для иерархических узлов невозможен). Аналогично обозначим через $D_R(A)$ поддерево из всех нижележащих для узла A узлов, имеющих $\text{Rank} = R$ или RI .

4 Новые операции над семантической сетью модели

4.1 Дублирование понятия

Введем процедуру дублирования H -понятия A в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Создается новое H -понятие B : $\text{Rank}(B) = R$, связывается связью ProtoOf с $\text{Proto}(A)$, т. е. $\text{Proto}(A) = \text{Proto}(B)$.
2. Среди атрибутов $\text{Proto}(A)$ выбирается случайное подмножество M .
3. Для каждого атрибута $OA_i \in M$ создается атрибут OB_i понятия B : $\text{Rank}(OB_i) = R$, $\text{Proto}(OA_i) = \text{Proto}(OB_i)$. В зависимости от типа OA_i далее над OB_i выполняются следующие действия:

4. Если Type(OA_i) = «Т», то дальнейшие действия над OB_i не требуются.
5. Если Type(OA_i) = «Д», то к OB_i присоединяется случайное дерево D = {D_j} : Rank(D_j) = R.
6. Если Type(OA_i) = «З» и если при этом OA_i имеет одну З-связь α с понятием ZA (Rank(α) = RI), то OB_i также связывается с ZA З-связью β: Rank(β) = R. А если OA_i имеет две З-связи: α₁ с понятием ZA₁ (Rank(α₁) = R) и α₂ с понятием ZA₂ (Rank(α₂) = I), то OB_i связывается с ZA₁ З-связью β: Rank(β) = R.

Введем процедуру дублирования A-понятия A в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Создается новое A-понятие B: Rank(B) = R, Proto(A) = Proto(B).
2. К B присоединяется случайное дерево D = {D_j} : Rank(D_j) = R.

Процедуру дублирования понятия будем обозначать B = Dub(A).

4.2 Добавление нового атрибута данного типа к Н-понятию

Если A — Н-понятие, OA — добавляемый атрибут (с деревом D, если OA — Д-атрибут и с З-связью β на понятие ZA, если OA — З-атрибут) и:

- (1) если A = Proto(A), то Rank(OA) = Rank(A);
- (2) если Proto(A) = A₁ ≠ A, то пусть k₁ — число атрибутов этого типа у A₁, а k — число атрибутов этого же типа у A (все они связаны с соответствующими атрибутами A₁ связями ProtoOf). Определим вероятность v:

$$v = \begin{cases} 1, & k_1 = 0; \\ \frac{k}{k_1}, & k_1 \neq 0. \end{cases}$$

С вероятностью v добавим новый атрибут OA₁ того же типа к A₁ (с деревом D₁, если OA — Д-атрибут, и с З-связью на понятие Proto(ZA), если OA — З-атрибут). Rank(OA₁) = I. Альтернатива: среди атрибутов A₁ того же типа, для которых не существует атрибута A, связанного с ним связью ProtoOf, выбираем случайным образом атрибут OA₁.

К A добавляется атрибут OA. Rank(OA) = Rank(A). Атрибуты OA и OA₁ соединяются связью ProtoOf (OA₁ = Proto(OA));

- (3) если OA — З-атрибут, выполняется Set : β(«З», OA → ZA). Операцию добавления атрибута обозначим как OA ⇒ A или OA() ⇒ A для Т-атрибута, OA(D) ⇒ A для Д-атрибута и OA(β, ZA) ⇒ A для З-атрибута.

4.3 Добавление поддерева к дереву Д-атрибута или А-понятия

Пусть A — Д-атрибут или А-понятие, $D_0 = D(A)$. Обозначать операцию присоединения случайного поддерева D к D_0 будем как $D \Rightarrow D_0$.

В $D_R(A)$ выбирается случайный узел D по принципу преимущественного присоединения: вероятность присоединения к узлу пропорциональна числу П-связей узла.

При присоединении Rank узлов D наследуется от DA.

4.4 Построение траектории в дереве

От иерархической структуры понятий экземпляр наследует одно соответствующее ему понятие, которое задается траекторией от корневого понятия к наследуемому. Так, операцию построения случайной траектории T в дереве D будем обозначать как $T = \text{Trace}(D)$. Конечный узел траектории обозначим $\text{End}(T)$. Число узлов в дереве D обозначим как $\eta(D)$, а число экземпляров, связанных (не связями типа ProtoTrace) с узлами D обозначим как $\xi(D)$. Число экземпляров, связанных связями типа ProtoTrace с узлами D , обозначим как $\mu(D)$.

Построение траектории осуществляется по следующему алгоритму: траектория строится последовательно от корневого узла D_{Root} , т. е. изначально $\text{End}(T) = D_{\text{Root}}$. На каждом шаге принимается решение о продолжении траектории. Решение о продолжении принимается с вероятностью, пропорциональной числу узлов дерева ниже конца траектории и равной $(\eta(D(\text{End}(T))) - 1)/(\eta(D) - 1)$.

Если принято решение о продолжении, то выбор ветви осуществляется случайно в соответствии с принципом преимущественного присоединения.

Пусть $\{T_i | i = 1, \dots, n\}$ — множество дочерних к $\text{End}(T)$ узлов дерева D . Тогда вероятность присоединения A_i к траектории T рассчитаем по формуле: $(\xi(D(A_i)) + 1)/(\sum_{i=1}^n \xi(D(A_i)) + n)$.

5 Изменения структуры сети и связанные с ними ошибки

5.1. Добавление нового А-понятия A со случайным деревом подпонятий D . Ошибки, влияющие на структуру данных, невозможны, поскольку $|D| \leq V_{\text{attn}}$.

5.2. Добавление нового Н-понятия O со случайным набором терминальных атрибутов $\{\text{OA}_i\}$. Ошибки, влияющие на структуру данных, невозможны, поскольку $|\{\text{OA}_i\}| \leq V_{\text{attn}}$.

5.3. Добавление нового Н-понятия O с атрибутом ОА, имеющим под собой случайное дерево D подпонятий. Ошибки, влияющие на структуру данных, невозможны, поскольку $|D| \leq V_{\text{attn}}$.

5.4. Добавление нового Н-понятия O с атрибутом с исходящей З-связью β на Н-понятие A . Выполняется $\text{Set} : \beta(\langle Z \rangle, \text{OA} \rightarrow A)$. Возможная ОСД: не был найден A . Выполняется $B = \text{Dub}(A)$, $\text{Set} : \beta(\langle Z \rangle, \text{OA} \rightarrow B)$.

5.5. Добавление нового Н-понятия O с атрибутом ОА с исходящей З-связью β на А-понятие A . Выполняется $\text{Set} : \beta(\langle\!\langle Z\rangle\!\rangle, \text{OA} \rightarrow A)$. Возможная ОСД: не был найден A и ОА получил тип «Д» вместо «З», т. е. некоторое случайное дерево D было присоединено к ОА. Выполняется: $\text{OA}(D) \Rightarrow O$, $\text{OA}_1(\beta, \text{Proto}(A)) \Rightarrow \Rightarrow O$: $\text{Rank}(\text{OA}) = R$, $\text{Rank}(\text{OA}_1) = I$, $\text{OA}_1 = \text{ProtoOf}(\text{OA})$, $\text{Rank}(D) = R$, $\text{Rank}(\beta) = I$.

5.6. Добавление нового Н-понятия O с атрибутом ОА с исходящей З-связью β на новое Н-понятие A . Ошибки, влияющие на структуру данных, невозможны.

5.7. Добавление нового терминального атрибута ОА к Н-понятию A . Выполняется $\text{OA} \Rightarrow A$. Возможная ОСД: не был найден A и вместо него создан новый узел $B = \text{Dub}(A)$. Выполняется $\text{OA} \Rightarrow B$.

5.8. Добавление нового Д-атрибута ОА, имеющего под собой случайное дерево подпонятий D , к Н-понятию A . Выполняется $\text{OA}(D) \Rightarrow A$. Возможная ОСД: не был найден A . Выполняется $B = \text{Dub}(A)$, $\text{OA} \Rightarrow B$.

5.9. Добавление нового З-атрибута ОА с исходящей З-связью β на Н-понятие ZA к Н-понятию A . Выполняется $\text{OA}(\beta, \text{ZA}) \Rightarrow A$. Ошибки, влияющие на структуру данных, возможны:

- не был найден A . Выполняется $B = \text{Dub}(A)$, $\text{OA}(\beta, \text{ZA}) \Rightarrow B$;
- не был найден ZA. Выполняется $ZB = \text{Dub}(\text{ZA})$, $\text{OA}(\beta, ZB) \Rightarrow A$.

5.10. Добавление нового З-атрибута ОА с исходящей З-связью β на А-понятие ZA ($\text{Rank}(\text{ZA}) \neq I$), имеющее под собой случайное дерево подпонятий D , к Н-понятию A ($\text{Rank}(A) \neq I$). $\text{OA}(\beta, \text{ZA}) \Rightarrow A$. Возможные ОСД:

- не был найден A . Выполняется $B = \text{Dub}(A)$, $\text{OA}(\beta, \text{ZA}) \Rightarrow B$;
- не был найден ZA и вместо З-атрибута добавляется новый Д-атрибут OB со случайным деревом D . Выполняется: $\text{OB}(D) \Rightarrow A$, $\text{OA}(\beta, \text{Proto}(\text{ZA})) \Rightarrow \Rightarrow A$: $\text{Rank}(\text{OB}) = R$, $\text{Rank}(\text{OA}) = I$, $\text{OA} = \text{ProtoOf}(\text{OB})$, $\text{Rank}(D) = R$, $\text{Rank}(\beta) = I$.

5.11. Добавление нового З-атрибута ОА с исходящей З-связью β на новое Н-понятие ZA к Н-понятию A . $\text{OA}(\beta, \text{ZA}) \Rightarrow A$. Возможная ОСД: не был найден ZA. Выполняется $ZB = \text{Dub}(\text{ZA})$, $\text{OA}(\beta, ZB) \Rightarrow A$.

5.12. Добавление случайного поддерева (ветви) D к дереву подпонятий D_0 , исходящего от А-понятия или Д-атрибута A ($\text{Rank}(A) \neq I$). $D \Rightarrow D_0$. Пусть BD — узел D , к которому выполняется присоединение поддерева. Возможная ОСД: если $\text{Rank}(\text{BD}) = RI$ и на уровне иерархии, к которому осуществляется присоединение, имеется слишком много узлов, то возможна ошибка смены основания деления: узлы D не наследуют Rank от BD, а получают $\text{Rank} = R$.

5.13. Добавление нового экземпляра EA Н-понятия A ($\text{Rank}(A) \neq I$) со случайным поднабором атрибутов $\{A_i\}$ из набора атрибутов понятия A ($\text{Rank}(A_i) \neq I$). Rank EA наследуется от A .

Если A_i — Д-атрибут, то от $D_R(A_i)$ наследуется только одна траектория $T = \text{Trace}(D_R(A_i))$ от A_i до некоторого узла $\text{End}(T) = DT_i \in D_R(A_i)$.

Если существует $\text{Fork}(\text{DT}_i)$, то строится (но не наследуется в сети экземпляров) траектория $T_1 = \text{Trace}(D_I(\text{Fork}'(\text{DT}_i)))$. Для $\text{End}(T_1)$ создается экземпляр EDS_i и EA соединяется связью типа ProtoTrace с EDS_i . Если $\text{Fork}(\text{DT}_i)$ не существует, то EA соединяется связью типа ProtoTrace с экземпляром DT_i , созданным при наследовании траектории T .

Если A_i — З-атрибут со связью на А-понятие OA, то создаются экземпляры A_i , OA и связываются экземпляром З-связи. От $D_R(OA)$ наследуется только одна траектория $T = \text{Trace}(D_R(OA))$ от OA до некоторого узла $\text{End}(T) = \text{DT}_i \in D_R(OA)$. Если существует $\text{Fork}(\text{DT}_i)$, то строится (но не наследуется в сети экземпляров) траектория $T_1 = \text{Trace}(D_I(\text{Fork}'(\text{DT}_i)))$. Для $\text{End}(T_1)$ создается экземпляр EDS_i и EA соединяется связью типа ProtoTrace с EDS_i . Если $\text{Fork}(\text{DT}_i)$ не существует, то EA соединяется связью типа ProtoTrace с экземпляром DT_i , созданным при наследовании траектории T .

5.14. Добавление экземпляра EOА нового атрибута OA из набора атрибутов Н-понятия A к экземпляру EA Н-понятия A. Правила наследования абсолютно аналогичны вышеописанным.

5.15. Установление Ч-связей при создании нового экземпляра. Если новый экземпляр A становится частью экземпляра A_0 ($\text{Rank}(A_0) \neq I$), выполняется $\text{Set} : \beta(\langle\text{Ч}\rangle, A \rightarrow A_0)$. Возможная ОСД: неустановление Ч-связи $\beta(A \rightarrow A_0)$. В этом случае устанавливается только Ч-связь $\beta_1(\text{Proto}(A) \rightarrow \text{Proto}(A_0))$. $\text{Rank}(\beta_1) = I$.

Если новый экземпляр A становится Ч-подхабом, т. е. случайное подмножество M частей $\{B_i\}$ какого-то Ч-хаба A_0 ($\text{Rank}(A_0) \neq I$) станут частями нового экземпляра, а сам он станет частью A_0 , то ошибки Ч-связей возможны:

- (1) не найден Ч-хаб A_0 . В этом случае никакие Ч-связи A_0 не изменяются;
- (2) для случайного подмножества $RM \subset OM$ изменение связей не производится. Пусть $OA_0 = \text{Proto}(A_0)$, $\{OB_i\}$ — множество частей OA_0 , $OM \subset \{OB_i\}$. Пусть $M \subset \{B_i\}$: $\forall i B_i \in M \Rightarrow \text{Proto}(B_i) \in OM$. Выполняются:
 - $\forall i : B_i \in M, \text{Proto}(B_i) \notin RM \rightarrow \text{Rem} : \alpha_i(B_i \rightarrow A_0)$, $\text{Set} : \beta_i(\langle\text{Ч}\rangle, B_i \rightarrow A)$;
 - $\forall j : OB_j \in OM \setminus \text{Proto}(M), \text{Proto}(B_j) \notin RM$ Ч-связь $\alpha_j(OB_j \rightarrow OA_0)$ заменяется на $\beta_j(OB_j \rightarrow A_0)$. $\text{Rank}(\alpha_j) = \text{Rank}(\beta_j) = I$;
 - $\text{Set} : \beta(\langle\text{Ч}\rangle, A \rightarrow A_0)$.

Если новый экземпляр A становится Ч-хабом, т. е. несколько экземпляров $\{B_i\}$, не имеющих входящих Ч-связей, станут его частями, то выполняется $\forall i \text{ Set} : \alpha_i(\langle\text{Ч}\rangle, B_i \rightarrow A)$. Возможная ОСД: неустановление Ч-связей для случайного подмножества $M \subset \{B_i\}$. Выполняется:

- $\forall i : B_i \notin M \rightarrow \text{Set} : \alpha_i(\langle\text{Ч}\rangle, B_i \rightarrow A)$;
- $\forall i : B_i \in M \rightarrow \text{Set} : \beta_i(\langle\text{Ч}\rangle, \text{Proto}(B_i) \rightarrow \text{Proto}(A))$, $\text{Rank}(\beta_i) = I$.

6 Поисковые запросы пользователей

Запрос моделируется экземпляром Н-понятия (или несколькими экземплярами, связанными З-связями), который используется как шаблон для поиска совпадающих с ним экземпляров. При этом запрос Q должен иметь два представления: одно — Q_R — для имитации поиска в реальной семантической сети, содержащей ОСД, а второе — Q_I — для имитации поиска в идеальной семантической сети. При сравнении результатов выполнения обоих представлений запроса можно судить о степени деградации сети.

Для построения Q_R выбирается случайное Н-понятие A и строится его экземпляр по обычным правилам за следующими исключениями:

- (1) не формируются связи ProtoTrace;
- (2) если у атрибута A имеется З-связь на Н-понятие B , то также по тем же правилам строится экземпляр B и добавляется в Q_R . Данная операция при необходимости проводится рекурсивно;
- (3) при построении траектории от Д-атрибута или А-понятия возможна ошибка запроса: если на данном уровне иерархии имеется слишком много узлов, то с вероятностью выбора траектория обрубается.

В Q_I строится копия Q_R со следующими изменениями:

- (1) вместо неиерархического узла или связи в Q_I переносится их прототип;
- (2) для иерархических узлов дерева с корнем в узле A (Д-атрибуте или А-понятии) рассматривается полная (не оборванная) траектория T :
 - если $\text{Rank}(\text{End}(T)) = \text{RI}$, то в Q_I переносится копия T ;
 - если $\text{Rank}(\text{End}(T)) = \text{R}$, то в Q_I создается новая случайная траектория T_1 в $D_I(A)$, причем если $\exists \text{ Fork}(\text{End}(T))$, то в $T \cap D_I(A)$ T_1 должна совпадать с T .

При этом в Q_I каждой траектории T с началом в узле A сопоставляется вероятность ω , определяемая формулой:

$$\omega(T) = \begin{cases} \frac{\mu(D_I(\text{End}(T)))}{\mu(D_I(A))}, & \mu(D_I(A)) \neq 0; \\ 1, & \mu(D_I(A)) = 0. \end{cases}$$

Поиск по Q_R и Q_I производится независимо.

При поиске по Q_I осуществляется отбор не только экземпляров поискового понятия, но и всех А-понятий, принадлежащих $\text{Gr}(A)$ с $\text{Rank} \neq \text{I}$. Если T — траектория в дереве D , связанном с А-понятием A_i , и $\text{Rank}(\text{End}(T)) = \text{R}$, то это означает, что один из атрибутов A_i ошибочно отклассифицирован, но из этого не следует, что A_i не подходит под критерии отбора. В этом случае

с вероятностью $\omega(T_0)$ T_0 считается удовлетворяющим условию. Поскольку результаты запросов усредняются, такое допущение является оправданным.

Результатом выполнения запроса выступают два множества экземпляров А-понятий: прошедших отбор по Q_R и прошедших отбор по Q_I . Обозначим их как Res_R и Res_I соответственно.

7 Показатель деградации семантической сети

Поскольку конечная цель моделируемой семантической сети — удовлетворение информационных потребностей пользователей, под деградацией сети будем понимать снижение ее поисковой доступности [11].

В соответствии с [12], большинство метрик, применяемых в современной оценке текстового поиска, основываются на отношении релевантности (принадлежности) документа запросу. Под релевантными документами будем понимать Res_I , под найденными системой — Res_R . Данные метрики основываются на матрице классификации:

Условие	Релевантны	Не релевантны
Найдено системой	$a = Res_I \cap Res_R $	$b = Res_R \setminus Res_I $
Не найдено системой	$c = Res_I \setminus Res_R $	d

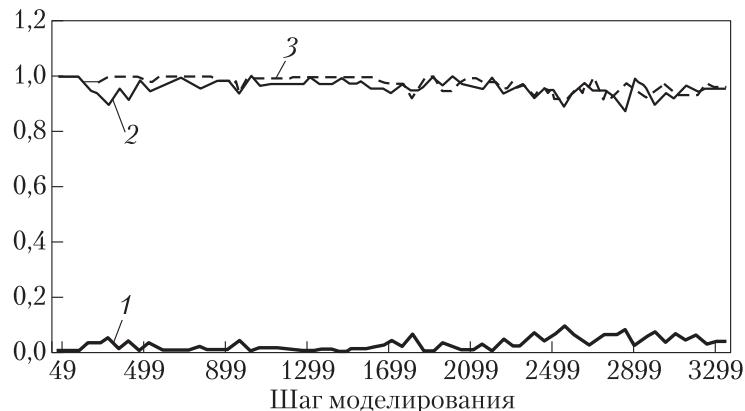
Оценка эффективности поиска базируется на следующих основных показателях:

- (1) полнота (recall), характеризующая способность системы находить нужные пользователю документы: $r = a/(a + c)$;
- (2) точность (precision), характеризующая способность системы выдавать в списке результатов только релевантные документы: $p = a/(a + b)$;
- (3) единая метрика F-мера (F-measure), вычисляемая как среднее гармоническое точности и полноты.

Определим степень деградации $S \in [0, +\infty)$ как обратное к усредненной F-мере минус 1. Малые значения S означают незначительное влияние ОСД на результат, а высокие — недостоверность результатов и невозможность использования построенной семантической сети без применения каких-либо мер, препятствующих деградации.

8 Результаты

Были проведены экспериментальные проверки модели в широком диапазоне параметров и с вероятностью ошибки пользователя, превышающей определенное выше предельное значение. Предметом изучения при проверке были такие



Изменение степени деградации (1), полноты (2) и точности (3) по мере роста сети

характеристики модели, как точность (r), полнота (p) и степень деградации (S) в динамике. На качественном уровне цель проверок состояла в определении возможности использовать исследуемую семантическую сеть в реальных задачах поддержки историко-биографических исследований без организации дополнительных мер поиска и исправления ошибок и в определении факта возможного взаимовлияния ошибок, приводящего к неограниченному росту степени деградации по мере их накопления. Типичный результат приведен на рисунке (время выражено в шагах моделирования).

Проверка показала, что влияние ОСД на поисковую доступность является небольшим и средние значения точности (r) и полноты (p) не опускаются ниже 95% даже при неправдоподобно высоком значении предельной вероятности ошибки. Среднее значение степени деградации (S) не превосходит 0,06, и неконтролируемого роста этого показателя не происходит. При этом факт взаимовлияния ошибок при их накоплении наблюдается. Так, примерно после 2200-го шага моделирования наблюдается падение среднего значения p с 99%–98% до 95%, а среднего значения r — с 97% до 95%, после чего значения опять стабилизируются. При этом S повышается с 0,02 до 0,06, после чего также стабилизируется.

9 Выводы

Высокие значения полноты и точности, а также отсутствие неограниченного роста степени деградации позволяют утверждать, что моделируемая семантическая сеть в принципе может использоваться в реальных задачах поддержки историко-биографических исследований без организации дополнительных мер поиска и исправления ошибок.

Но из факта наличия взаимовлияния ошибок при их накоплении вытекает желательность разработки таких мер. Проверка эффективности этих мер может быть также осуществлена при помощи рассматриваемой модели.

Литература

1. Адамович И. М., Волков О. И. Технология распределенного автоматизированного анализа исторических текстов // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 148–161.
2. Адамович И. М., Волков О. И. Об одном подходе к моделированию процесса развития семантической сети // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 143–154.
3. Юдицкий С. А. Графодинамическое имитационное моделирование развития сетевых структур // Управление большими системами, 2011. Вып. 33. С. 21–34.
4. Бадрызлов В. А. Принципы генерации случайных графов для моделирования сети Интернет // Омский научный вестник, 2014. № 3(133). С. 204–208.
5. Евин И. А., Кобляков А. А., Савриков Д. В., Шувалов Н. Д. Когнитивные сети // Компьютерные исследования и моделирование, 2011. Т. 3. № 3. С. 231–239.
6. Пряжников Н. С., Пряжникова Е. Ю. Психология труда и человеческого достоинства. — М.: Академия, 2003. 480 с.
7. Агеев М. С., Добров Б. В., Лукашевич Н. В. Автоматическая рубрикация текстов: методы и проблемы // Ученые записки Казанского ун-та. Сер.: Физико-математические науки, 2008. Т. 150. Кн. 4. С. 25–40.
8. Комарова Т. К. Психология внимания. — Гродно: ГрГУ, 2002. 124 с.
9. Белов С. В., Ильницкая А. В., Козыяков А. Ф. и др. Безопасность жизнедеятельности / Под общ. ред. С. В. Белова. — 6-е изд. — М.: Высшая школа, 2006. 616 с.
10. Гусев Д. А. Краткий курс логики: Искусство правильного мышления. — М.: НЦ ЭНАС, 2003. 190 с.
11. Морвиль П. Тотальная видимость / Пер. с англ. — СПб.: Символ-Плюс, 2008. 272 с. (Morville P. Ambient findability. — Beijing: O'Reilly Media, 2005. 208 p.)
12. Агеев М. С., Кураленок И. Е., Некрестьянов И. С. Официальные метрики РОМИП'2010 // Российский семинар по оценке методов информационного поиска: Труды РОМИП'2010. — Казань, 2010. С. 172–187.

Поступила в редакцию 03.07.17

THE INFLUENCE OF USER ERRORS ON SEMANTIC NET QUALITY DYNAMICS

I. M. Adamovich and O. I. Volkov

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 is devoted to the description and rationale of the approach to the modeling of errors of independent users in forming of a semantic net which is the basis for the distributed technology of concrete historical investigation support and to the quantitative assessment of degree of influence of these errors over the net structure. The proposed approach is to expand the semantic net model which is based on the concepts of graphodynamics and the Barabasi–Albert model by including of the new mechanism of parallel fixation of mistaken and appropriate nonmistaken (ideal) user actions and also the mechanism of imitation of search queries which perform parallelly in distorted and nondistorted subnets. Within this approach, the classification of errors affecting the net structure was made and the integral index of semantic net quality was also developed. The experimental studies of user errors impact on semantic net quality dynamics have been undertaken using this model.

Keywords: semantic net; model; user errors; search query; net quality

DOI: 10.14357/08696527170412

References

1. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2016. Tekhnologiya raspredelennogo avtomatizirovannogo analiza istoricheskikh tekstov [The distributed automated technology of historical texts analysis]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 3(26):148–161.
2. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2017. Ob odnom podkhode k modelirovaniyu protsesssa razvitiya semanticheskoy seti [An approach to modeling the semantic net evolution]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):143–154.
3. Yuditskiy, S. A. 2011. Grafodinamicheskoe imitatsionnoe modelirovanie razvitiya setevykh struktur [Graphodynamic simulation modeling of network structures evolution]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Large-Scale Systems Control] 33:21–34.
4. Badryzlov, V. A. 2014. Printsipy generatsii sluchaynykh grafov dlya modelirovaniya seti Internet [The principles of generation of random graphs for simulation of the Internet]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bull.] 133(3):204–208.
5. Yevin, I. A., A. A. Koblyakov, D. V. Savricov, and N. D. Shuvalov. 2011. Kognitivnye seti [Cognitive networks]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling] 3(3):231–239.

6. Pryazhnikov, N. S., and E. Yu. Pryazhnikova. 2003. *Psichologiya truda i chelovecheskogo dostoinstva* [The psychology of labor and human dignity]. Moscow: Academy Publs. 480 p.
7. Ageev, M. S., B. V. Dobrov, and N. V. Loukachevitch. 2008. Avtomaticheskaya rubrikatsiya tekstov: Metody i problemy [Automatic text categorization: Methods and problems]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser.: Fiziko-matematicheskie nauki* [Proceedings of Kazan University. Physics and mathematics ser.] 150(4):25–40.
8. Komarova, T. K. 2002. *Psichologiya vnimaniya* [Psychology of attention]. Grodno, Belarus: Yanka Kupala State University of Grodno. 124 p.
9. Belov, S. V., A. V. Ilnitskaya, A. F. Koziakov, et al. 2006. *Bezopasnost' zhiznedyatel'nosti* [Life safety]. Ed. S. V. Belov. 6th ed. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 615 p.
10. Gusev, D. A. 2003. *Kratkiy kurs logiki: Iskusstvo pravil'nogo myshleniya* [Short course of logic: The art of right thinking]. Moscow: NC ENAS Publ. 190 p.
11. Morville, P. 2005. *Ambient findability*. Beijing: O'Reilly Media. 208 p.
12. Ageev, M. S., I. E. Kuralenok, and I. S. Nekrest'yanov. 2010. Ofitsial'nye metriki ROMIP 2010 [ROMIP'2010 official metrics]. *Rossiyskiy seminar po otsenke metodov informatsionnogo poiska. Trudy ROMIP'2010* [Russian Information Retrieval Evaluation: ROMIP 2010 Seminar Proceedings]. Kazan: Kazan University Publ. 172–187.

Received July 3, 2017

Contributors

Adamovich Igor M. (b. 1934) — Candidate of Science (PhD) in informatics, Head of Department, 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; Adam@amsd.com

Volkov Oleg I. (b. 1964) — leading programmer, 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; Volkov@amsd.com

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЧАСТОТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕВОДА КОННЕКТОРОВ И ОБРАТИМОСТЬ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ*

И. М. Зацман¹, М. Г. Кружков², Е. Ю. Лощилова³

Аннотация: Рассматриваются методы анализа частотности аннотаций коннекторов русского языка и моделей их перевода на французский язык, реализованные в надкорпусной базе данных (НБД), содержащей параллельные тексты. Кроме них НБД содержит двуязычные аннотации переводных соответствий, включающих одновременно как рубрики исследуемых языковых единиц, в данном случае коннекторов, так и рубрики их переводов, найденных в параллельных текстах. Рубрики, приводимые лингвистами в НБД и принадлежащие к фасетным классификациям, многоаспектно описывают модели перевода исследуемых языковых единиц. Характерной чертой реализации в НБД методов анализа частотности коннекторов и моделей их перевода является обратимость процесса вычисления статистических данных. Другими словами, значение частотности некоторого коннектора является гиперссылкой к списку аннотаций случаев употребления этого коннектора в параллельных текстах НБД. Поддержка в НБД фасетных классификаций обеспечивает возможность проведения многоаспектного статистического анализа аннотированных коннекторов и моделей их перевода. При этом получаемые статистические данные являются верифицируемыми, так как динамически формируются ссылки от вычисленных данных к спискам соответствующих им аннотаций. Основная цель статьи заключается в описании методов анализа частотности моделей перевода коннекторов, включая те методы, которые обеспечивают обратимость процесса генерализации вычисляемых статистических данных о моделях перевода разной степени обобщения.

Ключевые слова: надкорпусная база данных; модели перевода; аннотирование моделей перевода; фасетные классификации; корпусная лингвистика; генерализация; обратимость процесса генерализации

DOI: 10.14357/08696527170413

* Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 16-06-00070).

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

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, magnit75@yandex.ru

³ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, lena0911@mail.ru

1 Введение

Одна из актуальных задач компьютерной лингвистики состоит в аннотировании коннекторов и моделей их перевода. Функция коннекторов заключается в обеспечении связности текста на естественном языке. При этом коннекторы могут выражать широкий спектр логико-семантических отношений (ЛСО) между отдельными фрагментами текста [1, 2]. Аннотируемый коннектор может состоять из одного (*хотя, притом, кстати*) и большего числа слов (*не только..., но и...; скорее..., чем...*); первые являются по своему составу однокомпонентными, вторые — многокомпонентными [3]. Получение статистических данных о коннекторах русского языка и моделях их перевода является одной из задач проекта по гранту РФФИ «Структура многокомпонентных коннекторов русского языка и принципы ее представления в лингвистических базах данных», который в настоящее время выполняется в Институте проблем информатики ФИЦ ИУ РАН.

В этом проекте предметом многоаспектного статистического анализа являются прямые и реверсивные двуязычные аннотации переводных соответствий коннекторов и моделей их перевода на французский язык. Аннотации формируются лингвистами в НБД в процессе контрастивного анализа параллельных текстов на русском и французском языках [4–6]. Прямые аннотации формируются в процессе сопоставления текстов на русском языке и их переводов на французский язык, а реверсивные аннотации — текстов на французском языке и их переводов на русский язык. Примеры двуязычных аннотаций приведены в [7].

В процессе сопоставления параллельных текстов при формировании прямой аннотации коннектору русского языка ставится в соответствие функционально эквивалентный фрагмент (ФЭФ — термин Д. Добровольского [8]) из текста перевода. При формировании реверсивной аннотации в переводе на русский язык ищется исследуемый коннектор. Затем для него определяется ФЭФ из оригинального текста на иностранном языке, который является стимулом появления этого коннектора в переводе на русский язык. Описание понятия «стимул» в контексте исследования моделей перевода дано в [9, 10].

Отличительной чертой всех моделей перевода является обратимость процесса их формирования в НБД, т. е. возможность обратного перехода ко всем аннотациям переводных соответствий, в результате обобщения которых была сформирована каждая из моделей. Обычно в процессе моделирования текстов и их языковых единиц сохраняются только общие черты обобщаемых объектов без возможности обратного к ним перехода [11].

Целью статьи является описание методов и функций статистического анализа частотности аннотаций переводных соответствий коннекторов русского языка и моделей их перевода на французский язык, реализованных в НБД, включая те из них, которые обеспечивают обратимость процесса вычисления статистических данных о генерализации аннотаций в НБД.

2 Формирование статистических данных

В НБД коннекторов реализованы четыре метода и запрограммированы четыре соответствующие функции для формирования статистических данных. Первая функция позволяет получать распределение абсолютной и относительной частотностей тех коннекторов в параллельных текстах НБД, для которых лингвистами сформированы аннотации переводных соответствий. Вторая функция служит для получения единичных статистических данных, получаемых в процессе выполнения поисковых запросов в НБД. Третья функция представляет собой распределение частотности моделей перевода исследуемых коннекторов. Четвертая функция позволяет получить статистические таблицы, формируемые на основе SQL-запросов пользователей-лингвистов.

2.1 Распределение частотности коннекторов и их блоков

Пример результата выполнения первой функции приведен в табл. 1, которая отражает распределение коннекторов, включающих слово «*только*». В эту

Таблица 1 Распределение по убыванию абсолютной суммарной частотности коннекторов и их блоков в аннотациях, сформированных в НБД

Речевые реализации коннекторов со словом <i>только</i>	Σ	В том числе			
		р-фр. анн. (тип 1)	р-фр. анн. (тип 2)	фр-р. анн. (тип 1)	фр-р. анн. (тип 2)
1 не только	299	16	268	6	9
2 только	139	134	5	0	0
3 не только но и	124	112	0	12	0
4 как только	82	45	23	14	0
5 лишь только	60	47	13	0	0
6 не только но даже	32	31	0	1	0
7 не только но	21	21	0	0	0
8 если только	20	17	1	2	0
9 не только ∅	19	16	0	3	0
10 вот только	16	16	0	0	0
11 не только и	10	10	0	0	0
12 не только даже	9	9	0	0	0
13 не только но даже и	8	8	0	0	0
14 не только но и	8	8	0	0	0
15 не только	8	8	0	0	0
16 только что	8	8	0	0	0
17 если б только	6	5	1	0	0
18 не только а	6	6	0	0	0
19 как только тотчас же	6	5	0	1	0
20 если бы только	5	1	4	0	0

Таблица 2 Русско-французские аннотации

Контекст в оригинале	Коннектор или его блок в оригинале и их рубрики	Контекст в переводе	Перевод коннектора или его блока и их рубрики
— Ах, Люда, я не хочу, чтобы ты была молода и красива, я одного хочу, чтобы у тебя было доброе сердце не только к кошкам и собакам.	не только ⟨отношение неединственности⟩ ⟨Контакт⟩	Mon Dieu, Liouda, je ne désire pas que tu sois jeune et belle, je ne voudrais qu'une seule chose, <i>que</i> tu sois bonne à l'égard des hommes comme tu l'es à l'égard des animaux.	comme ⟨сравнительные⟩ ⟨с предикацией⟩ ⟨начальная⟩ ⟨р CNT q⟩ ⟨CNT⟩ ⟨SubCNT⟩
Боже сохрани, чтоб он поставил другого какого-нибудь барина не только выше, даже наравне с своим!	не только ⟨с предикацией⟩ ⟨неначальная⟩ ⟨Part⟩ ⟨Контакт⟩	Dieu le préserve de placer un autre maître non seulement au-dessus, mais même à égalité du sien!	non seulement ⟨с предикацией⟩ ⟨неначальная⟩ ⟨Part⟩ ⟨Контакт⟩

таблицу включены первые 20 (по убыванию частотности) таких коннекторов, которые встречаются в параллельных текстах НБД 5 и более раз. Самым частотным является коннектор «**не только**» (299 раз). Всего коннекторов, включающих слово «**только**», зарегистрировано в НБД 195. В табл. 1 помимо абсолютных частотностей коннекторов, обозначенных символом Σ , для каждого из них указаны значения еще четырех абсолютных частных частотностей для следующих видов аннотаций переводных соответствий, определенных в [6]:

- русско-французская аннотация для коннектора (табл. 2), которую обозначим как «р-фр. анн. (тип 1)» (третья колонка в табл. 1);
- французско-русская аннотация для коннектора (табл. 3), которую обозначим как «фр-р. анн. (тип 1)» (пятая колонка в табл. 1);
- русско-французская аннотация для компонента (блока) коннектора (см. табл. 2), состоящего из двух и более элементов, которую обозначим как «р-фр. анн. (тип 2)» (четвертая колонка в табл. 1);
- французско-русская аннотация для компонента (блока) коннектора, состоящего из двух и более элементов (см. табл. 3), которую обозначим как «фр-р. анн. (тип 2)» (шестая колонка в табл. 1).

Важно отметить, что табл. 1 содержит данные о числе коннекторов в аннотациях переводных соответствий. Другие статистические таблицы (см., например,

Таблица 3 Французско-русские аннотации

Контекст в оригинале	Коннектор или его блок в оригинале и их рубрики	Контекст в переводе	Перевод коннектора или его блока и их рубрики
Je sais que vous n'allez pas me croire mais <i>je n'ai pas</i> choisice métier seulement pour l'argent. J'aime imaginer des phrases.	ne pas seulement ⟨неединственности⟩ ⟨с предикацией⟩ ⟨неначальная⟩ ⟨CNT q p⟩ ⟨CNT⟩ ⟨Дистант⟩	Знаю, вы мне не поверите, но эту профессию я выбрал не только из-за денег. Я люблю изобретать фразы.	не только ⟨неединственности⟩ ⟨без предикации⟩ ⟨неначальная⟩ ⟨CNT q p⟩ ⟨CNT⟩ ⟨Контакт⟩
Il vont enfin savoir ce que les consommateurs regardent et écoutent chez eux, mais pas seulement devant la télé, en voiture aussi, dans l'hypermarché, partout!	pas seulement ⟨без предикации⟩ ⟨начальная⟩ ⟨Part⟩ ⟨Neg⟩ ⟨Контакт⟩	Наконец-то они выяснят, что потребители смотрят и слушают, причем не только дома, перед телевизором, но и в машине, и в супермаркете — словом, везде и всюду!	не только ⟨без предикации⟩ ⟨начальная⟩ ⟨Part⟩ ⟨Neg⟩ ⟨Контакт⟩

табл. 6) могут содержать данные о самих переводных соответствиях. Разница между числом коннекторов со словом «только» и числом переводных соответствий, включающих в себя эти коннекторы, возникает за счет того, что для ряда произведений в НБД включено несколько вариантов перевода на французский язык (в этом случае переводные соответствия формируются для каждого перевода).

Распределение частотности коннекторов и их блоков создается программно. В процессе формирования новых аннотаций распределение автоматически пересчитывается.

В табл. 2 приведены две аннотации переводных соответствий: одна из 16 русско-французских аннотаций, включающих в себя «не только» в функции коннектора, и одна из 268 русско-французских аннотаций, включающих в себя «не только» в функции блока коннектора «не только||даже».

В табл. 3 также приведены две аннотации переводных соответствий: одна из 6 французско-русских, построенных для стимула появления коннектора «не только» в переводе на русский язык и одна из 9 французско-русских аннотаций, построенных для стимула появления блока «не только», входящего в состав коннектора «не только||но||и» в переводе.

2.2 Единичные статистические данные

Вторая функция обеспечивает получение единичных статистических данных в результате выполнения поисковых запросов в НБД. Для задания параметров запроса используется поисковый шаблон в виде таблицы (см. рис. 2 в работе [12]), которая включает 20 полей, где пользователь может задавать искомые значения и логические выражения. В результате поиска пользователь получает не только количество аннотаций переводных соответствий заданным поисковым параметрам, но и список аннотаций переводных соответствий, которые затем могут использоваться для дальнейшего лингвистического анализа.

Рассмотрим поля поискового шаблона на рис. 2 из работы [12] более подробно. В первом поле первой строки задается перечень книг (задано 6 книг). Если в НБД хранятся несколько переводов книги, то во втором поле можно указать ее перевод(ы). В первом поле второй строки задается вид искомой аннотации (для коннектора в целом, его блоков или его неделимых элементов). Виды аннотаций определены в [6]. В этом поле задано значение «Кортеж 1, Type 1». Это означает, что при поиске будут отбираться аннотации, сформированные для коннекторов в целом. Во втором поле указываются дата и интервал времени формирования для искомых аннотаций.

В третьем поле второй строки «Кластер речевых реализаций (РР) в оригинале» указан кластер *только*. Это означает, что при поиске будут отобраны русско-французские аннотации с речевыми реализациями коннекторов, которые включают слово «*только*». При этом русско-французские аннотации блоков коннекторов с этим словом отбираются не будут, так как в первом поле второй строки задается поиск только коннекторов в целом, примеры которых приведены в табл. 1.

Кроме того, в этом поисковом шаблоне заданы еще два параметра поиска:

- (1) коннектор выражает временные отношения;
- (2) маркирует часть предложения с предикцией; иными словами, вводимый коннектором фрагмент текста имеет предиктивную структуру.

Число аннотаций, которые были найдены по составленному поисковому шаблону 20.08.2017, равно 54. В табл. 4 приведены три из них.

2.3 Распределение частотности моделей перевода

Третья статистическая функция позволяет получить данные относительно распределения аннотаций переводных соответствий по моделям перевода исследуемых коннекторов, что позволяет судить о частотности той или иной модели перевода в НБД.

В качестве примера рассмотрим модели перевода речевой реализации «*не только*» на французский язык. Всего в НБД для него зарегистрировано 29 моделей перевода, включая *unknowp* (когда смысл в переводе в целом передан верно,

Таблица 4 Три примера найденных аннотаций

Контекст в оригинале	Коннектор или его блок в оригинале и их рубрики	Контекст в переводе	Перевод коннектора или его блока и их рубрики
Тогда, лишь только процессия вышла на самый верх за цепь, он и появился впервые и притом как человек явно опоздавший.	лишь только ⟨временные⟩ ⟨с предикацией⟩ ⟨неначальная⟩ ⟨CNT q p⟩ ⟨CNT⟩ ⟨Контакт⟩	Au moment précis, <i>en effet, où</i> le cortège franchissait le deuxième cordon de légionnaires et atteignait le sommet, il fut le premier à sortir de la foule et à se précipiter en avant, comme s'il redoutait d'arriver trop tard.	au moment précis ou ⟨временные⟩ ⟨начальная⟩ ⟨CNT q p⟩ ⟨CNT⟩ ⟨Контакт⟩ ⟨сложное предложение⟩ ⟨SubCNT⟩
Поэт бросился бежать к турникуту, как только услыхал первый вопль,	как только ⟨временные⟩ ⟨с предикацией⟩ ⟨начальная⟩ ⟨р CNT q⟩ ⟨CNT⟩ ⟨Контакт⟩	<i>C'est au moment précis où</i> il avait entendu le premier hurlement <i>que</i> le poète s'était précipité vers le tourniquet.	au moment précis où ⟨временные⟩ ⟨с предикацией⟩ ⟨неначальная⟩ ⟨CNT q p⟩ ⟨CNT⟩ ⟨SubCNT⟩ ⟨Контакт⟩
потому что публика прямо валом пошла, лишь только увидела дополнительную афишу.	лишь только ⟨временные⟩ ⟨с предикацией⟩ ⟨неначальная⟩ ⟨р CNT q⟩ ⟨CNT⟩ ⟨SubCNT⟩ ⟨Контакт⟩	<i>Parce que</i> le public était venu en foule dès qu' on avait collé les affiches supplémentaires.	dès que ⟨временные⟩ ⟨с предикацией⟩ ⟨начальная⟩ ⟨р CNT q⟩ ⟨CNT⟩ ⟨SubCNT⟩ ⟨Контакт⟩

но невозможно выделить элемент или конструкцию, отвечающие за это) и *zero*, т. е. отсутствие переводного эквивалента в переводе. Для этих 29 моделей сформировано 312 русско-французских аннотаций для случаев, когда «не только» является блоком некоторого коннектора.

В табл. 5 приведены данные для семи наиболее частотных вариантов перевода: «*non seulement*», *unknown*, «*ne|pas seulement*», *zero*, «*pas seulement*», «*ne|pas|seulement*», «*loin de*». Суммарная статистика о частотности для остальных 22 моделей перевода приведена в предпоследней строке таблицы.

Подчеркнем, что при работе с НБД числа, указанные в третьей колонке табл. 5, являются гиперссылками, что обеспечивает обратимость процесса полу-

Таблица 5 Распределение частотности моделей перевода «*не только*»

Слова, выполняющие функцию коннектора	Соответствующая им модель перевода во французском языке	Абсолютная частотность соответствующей модели перевода в НБД	Относительная частотность соответствующей модели перевода, %
не только	non seulement	177	56,73
	unknown	42	13,46
	ne pas seulement	34	10,90
	zero	16	5,13
	pas seulement	6	1,92
	ne pas seulement	4	1,28
	loin de	3	0,96
	Остальные 22 варианта перевода	30	10,58
Число аннотаций		312	100

чения статистических данных. Другими словами, значение частотности является ссылкой к списку аннотаций всех случаев употребления соответствующей модели перевода в параллельных текстах НБД. Наличие гиперссылок делает статистику наглядной и верифицируемой, а также предоставляет возможность проанализировать аннотации после получения статистических данных. Это является важным отличием НБД коннекторов в сравнении с другими электронными лингвистическими ресурсами.

Полученные статистические данные показывают, что наиболее частотным соответствием для «*не только*» является «*non seulement*», на долю которого приходится 177 аннотаций.

2.4 Таблицы, формируемые на основе SQL-запросов

Четвертая статистическая функция обеспечивает пользователей-лингвистов широким спектром статистических таблиц, формируемых на основе SQL-запросов. Каждый участник проекта может описать нужную ему статистику, для которой создается SQL-запрос. Список созданных запросов хранится в НБД и доступен для их исполнения.

В табл. 6 представлен результат SQL-запроса, который вычисляет количество РР коннектора со словом «*только*», помеченных рубриками фасетной классификации, которые описаны в работе [6]. В данном запросе учитываются только РР, для которых сформированы переводные соответствия, обозначенные как тип 1 (см. табл. 1).

Таблица 6 наглядно иллюстрирует возможные аспекты статистического описания многокомпонентных коннекторов в НБД с помощью SQL-запросов. Например, 15 рубрик фасета «*Отношения*» говорят о широком спектре ЛСО,

Таблица 6 Распределение РР коннекторов со словом «только» по рубрикам фасетной классификации

Фасет	Рубрики фасета	Число РР в аннотациях
Отношения	неединственности	301
	временные	150
	TBD — to be defined	84
	условные	32
	исключение	15
	генерализация	7
	коррекция	6
	соединительные	6
	экстенсиональная генерализация	6
	контраст	4
	спецификация	1
	уступительные	1
	причина	1
	противительные	1
	противопоставление	1
	интенсиональная генерализация	1
Позиция	начальная	189
	неначальная	12
Порядок	CNT p CNT q	359
	p CNT q	132
	CNT q p	68
	CNT p CNT q [= CNT r, CNT s, . . .]	14
	CNT p [= CNT r, CNT s, . . .] CNT q	6
	CNT q [= CNT r, CNT s, . . .] p	3
	CNT p [= CNT r, CNT s, . . .] CNT q [= CNT t, CNT u, . . .]	1
Расположение	Дистант	380
	Контакт	212
Статус	CNT	573
	SubCNT	146
	SuperCNT	26
	Neg	5
Структура	с предикацией	122
	повествовательное	32
	без предикации	19
	вставка	18
	вопросительное	6
	восклицательное	3
	сложное предложение	1
СФЕ — маркирует сверхфразовое единство		1

выражаемых коннекторами со словом «*только*», а также об абсолютной частотности каждого из этих 15 ЛСО. Наиболее частотными являются отношения неединственности и временные отношения. На третьем месте по частотности стоит специальная 16-я рубрика TBD, которая проставляется в тех случаях, когда не удается определить вид ЛСО. Кроме рубрик фасета «Отношения» в табл. 6 включены рубрики еще пяти фасетов: «Позиция», «Порядок», «Расположение», «Статус» и «Структура» [6], — для каждой из которых также указана абсолютная частотность РР коннекторов со словом «*только*».

3 Заключение

Надкорпусная база данных коннекторов предоставляет пользователю-лингвисту широкие возможности для получения статистических данных о свойствах коннекторов, исходя из целей и задач лингвистического исследования. Основными преимуществами этих статистических данных являются их наглядность и верифицируемость, что обеспечивается за счет гиперссылок, ведущих к аннотациям, что также обеспечивает и обратимость процесса получения статистических данных.

Согласно работе [12], в отличие от большинства статистических данных, предоставляемых другими электронными лингвистическими ресурсами, получаемая с помощью НБД статистика характеризует в первую очередь сами анализируемые языковые единицы, а не содержащие их тексты. Так, статистические данные в табл. 6 по рубрикам фасета «Отношения» позволяют определить для полисемичных коннекторов, какое из отношений является для каждого из них наиболее частотным.

Статистические данные, которые обеспечивает НБД, становятся, таким образом, важной составляющей лингвистического анализа многокомпонентных коннекторов, дополняя его и являясь средством его верификации. При этом обработка и анализ статистических данных открывают новые перспективы исследования и дают лингвистам возможность ответить на многие пока не решенные вопросы.

Литература

1. Prasad R., Bunt H. Semantic relations in discourse: The current state of ISO 24617-8 // 11th Joint ACL-ISO Workshop on Interoperable Semantic Annotation Proceedings. — Tilburg: Tilburg University, 2015. P. 80–92.
2. Bunt H., Prasad R. ISO-DR-Core (ISO 24617-8): Core concepts for the annotation of discourse relations // 12th Joint ACL-ISO Workshop on Interoperable Semantic Annotation Proceedings, 2016. P. 45–54. <http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2016/LREC2016.Proceedings.zip>.
3. Зацман И. М., Инькова О. Ю., Кружков М. Г., Попкова Н. А. Представление кроссязыковых знаний о коннекторах в надкорпусных базах данных // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 1. С. 106–118.

4. Инькова-Манзотти О. Ю. Коннекторы противопоставления во французском и русском языках. Сопоставительное исследование. — М.: Информэлектро, 2001. 432 с.
5. Зализняк Анна А., Зацман И. М., Инькова О. Ю., Кружков М. Г. Надкорпусные базы данных как лингвистический ресурс // Корпусная лингвистика — 2015: Тр. 7-й Междунар. конф. — СПб.: СПбГУ, 2015. С. 211–218.
6. Зализняк Анна А., Зацман И. М., Инькова О. Ю. Надкорпусная база данных коннекторов: построение системы терминов // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 1. С. 100–108.
7. Зацман И. М., Мамонова О. С., Щурова А. Ю. Обратимость и альтернативность генерализации моделей перевода коннекторов в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 125–142.
8. Добровольский Д. О., Кретов А. А., Шаров С. А. Корпус параллельных текстов: архитектура и возможности использования // Национальный корпус русского языка: 2003–2005. — М.: Индрик, 2005. С. 263–296.
9. Loiseau S., Sitchinava D. V., Zalizniak Anna A., Zatsman I. M. Information technologies for creating the database of equivalent verbal forms in the Russian–French multivariant parallel corpus // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 2. С. 100–109.
10. Сичинава Д. В. Использование параллельного корпуса для количественного изучения лингвоспецифичной лексики // Язык, литература, культура: актуальные проблемы изучения и преподавания. — М.: МАКС Пресс, 2014. Вып. 10. С. 37–44.
11. Эко У. Открытое произведение / Пер. с итал. — СПб.: Академический проект, 2004. 384 с. (Eco U. Opera aperta. — Milano: Bompiani, 1967. 286 р.)
12. In'kova O. Yu., Popkova N. A. Statistical data as information source for linguistic analysis of Russian connectives // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 3. С. 123–131.

Поступила в редакцию 15.09.17

METHODS OF FREQUENCY ANALYSIS OF CONNECTIVES TRANSLATIONS AND REVERSIBILITY OF STATISTICAL DATA GENERALIZATION

I. M. Zatsman, M. G. Kruzhkov, and E. Ju. Loshchilova

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 methods of Russian connectives frequency analysis are examined, including analysis of their translation models in Russian–French parallel texts. The parallel texts are integrated into a supracorpora database (SCDB) which also includes bilingual annotations of translation correspondences. The annotations include properties of the examined linguistic items (Russian connectives) and, at the same time, properties of the corresponding linguistic items found in the translation. These properties are organized as a faceted classification in

the SCDB describing the translation models found in the SCDB from various perspectives. A characteristic feature of the connectives translations frequency analysis methods implemented in the SCDB is the reversibility of the calculated statistical data, meaning that the calculated frequency values act as hyperlinks to the lists of the annotations those values are based on, which represent occurrences of the corresponding connectives in the parallel texts of the SCDB. The use of faceted classifications in the SCDB allows for multidimensional statistical analysis of the annotated connectives and translation models. The calculated statistical data are verifiable because they allow tracing the given values directly to the annotations they are based on. The main goal of this paper is to describe methods of frequency analysis of connectives translation models, including those that support the reversibility of the calculated statistical data on different generalization levels.

Keywords: supracorpora database; translation models; annotation of translation models; faceted classifications; corpus linguistics; generalization; reversibility of generalization process

DOI: 10.14357/08696527170413

Acknowledgments

This research was performed at the Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, and partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 16-06-00070).

References

1. Prasad, R., and H. Bunt. 2015. Semantic relations in discourse: The current state of ISO 24617-8. *11th Joint ACL-ISO Workshop on Interoperable Semantic Annotation Proceedings*. Tilburg: Tilburg University. 80–92.
2. Bunt, H., and R. Prasad. 2016. ISO-DR-Core (ISO 24617-8): Core concepts for the annotation of discourse relations. *12th Joint ACL-ISO Workshop on Interoperable Semantic Annotation Proceedings*. 45–54. Available at: http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2016/LREC2016_Proceedings.zip (accessed November 7, 2017).
3. Zatsman, I. M., O. Yu. In'kova, M. G. Kruzhkov, and N. A. Popkova. 2016. Predstavlenie krossyazykovykh znaniy o konnektorakh v nadkorpusnykh bazakh dannykh [Representation of cross-lingual knowledge about connectors in supracorpora databases]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(1):106–118.
4. In'kova-Manzotti, O. Yu. 2001. *Konnektory protivopostavleniya vo frantsuzskom i russkom yazykakh. Sopostavitel'noe issledovanie* [Connectives of opposition in Russian and French. Comparative research]. Moscow: Informelektro. 432 p.
5. Zaliznyak, Anna A., I. M. Zatsman, O. Yu. In'kova, and M. G. Kruzhkov. 2015. Nadkorpusnye bazy dannykh kak lingvisticheskiy resurs [Supracorpora databases as linguistic resource]. *7th Conference (International) on Corpus Linguistics Proceedings*. St. Petersburg: St. Petersburg State University. 211–218.

6. Zaliznyak, Anna A., I. M. Zatsman, and O. Yu. In'kova. 2017. Nadkorpusnaya baza dannykh konnektorov: postroenie sistemy terminov [Supracorpora database on connectives: Term system development]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(1):100–108.
7. Zatsman, I. M., O. S. Mamanova, and A. Yu. Shchurova. 2017. Obratimost' i al'ternativnost' generalizatsii modeley perevoda konnektorov v parallel'nykh tekstakh [Reversibility and alternativeness of generalization of connectives translations models in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):125–142.
8. Dobrovolskiy, D. O., A. A. Kretov, and S. A. Sharov. 2005. Korpus parallel'nykh tekstov: arkhitekturna i vozmozhnosti ispol'zovaniya [Corpus of parallel texts: Architecture and applications]. *Natsional'nyy korpus russkogo yazyka: 2003–2005* [The Russian National Corpus 2003–2005]. Moscow: Indrik. 263–296.
9. Loiseau, S., D. V. Sitchinava, Anna A. Zalizniak, and I. M. Zatsman. 2013. Information technologies for creating the database of equivalent verbal forms in the Russian–French multivariant parallel corpus. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):100–109.
10. Sichinava, D. V. 2014. Ispol'zovanie parallel'nogo korpusa dlya kolichestvennogo izucheniya lingvospetsifichnoy leksiki [Using a parallel corpus for quantitative research of language-specific lexis]. *Yazyk, literatura, kul'tura: aktual'nye problemy izucheniya i prepodavaniya* [Language, literature, culture: Urgent problems of research and teaching]. Moscow: MAKS Press. 10:37–44.
11. Eco, U. 1967. *Opera aperta*. Milano: Bompiani. 286 p.
12. In'kova, O. Yu. and N. A. Popkova. 2017. Statistical data as information source for linguistic analysis of Russian connectors. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(3):123–131.

Received September 15, 2017

Contributors

Zatsman Igor M. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, Head of Department, 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; izatsman@yandex.ru

Kruzhkov Mikhail G. (b. 1975) — 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; magnit75@yandex.ru

Loshchilova Elena Ju. (b. 1960) — 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; lena0911@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СЕРВИСА «ПЕРСОНАЛЬНАЯ ТЕЛЕМЕДИЦИНА»

Г. Я. Илюшин¹, В. И. Лиманский²

Аннотация: Рассмотрена возможность применения мобильных телемедицинских комплексов (МТК) и сервисов персональной телемедицины (ПТМ) для повышения доступности и улучшения качества медицинской помощи, предоставляемой жителям труднодоступных и удаленных населенных пунктов РФ. Описано назначение и основные функции сервиса ПТМ, применение которого позволяет организовать удаленный мониторинг состояния здоровья пациентов и сократить число посещений пациентами врачей лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ) в процессе прохождения пациентами курса амбулаторного или восстановительного лечения. Определены подходы к реализации сервиса ПТМ на базе сервисов и приложений личного кабинета пациента (ЛКП). Представлена возможная схема организации процесса предоставления медицинских услуг населению удаленных и труднодоступных населенных пунктов с использованием МТК и сервисов ПТМ.

Ключевые слова: телемедицинские центры; мобильные телемедицинские комплексы (МТК); амбулаторные ЛПУ; телекоммуникационный центр МТК; личный кабинет пациента (ЛКП)

DOI: 10.14357/08696527170414

1 Введение

Важной задачей, стоящей перед системой здравоохранения РФ, является повышение качества и доступности медицинской помощи населению. Особенно актуально данный вопрос стоит для жителей удаленных и труднодоступных населенных пунктов, а также для групп населения, которые в силу особенностей их профессиональной деятельности длительное время находятся на территориях, не охваченных сетью стационарных медицинских учреждений. К таким группам относятся люди, занимающиеся отгонным скотоводством, работники вахтовых бригад на строительстве дорог, линий электропередачи, трубопроводов и т. п. Во всех этих случаях людям по месту их жительства или временного пребывания должен предоставляться необходимый спектр медицинских услуг, включая лечение, диагностику, профилактические и диспансерные обследования.

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

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

Одним из способов решения указанной задачи является использование МТК [1] для оказания медицинских услуг перечисленным группам населения. Мобильные телемедицинские комплексы представляют собой автономные передвижные телемедицинские лабораторно-диагностические комплексы различной специализации, смонтированные на разных платформах доставки (автомобили, поезда, речные, морские и воздушные суда). Такие комплексы снабжены средствами телекоммуникационной связи, автономными энергоустановками, укомплектованы различным диагностическим и лабораторным оборудованием и обслуживаются медицинскими бригадами разной специализации. Мобильные телемедицинские комплексы могут оперативно прибывать в любую точку для оказания населению необходимой медицинской помощи.

В работе [2] представлена трехсегментная модель построения телемедицинской системы (ТМС), в которой оказание медицинских услуг населению с использованием МТК укладывается в рамки действующего законодательства и нормативных актов об оказании медицинской помощи населению в системе обязательного медицинского страхования.

При оказании плановой медицинской помощи бригады МТК выезжают в удаленные или труднодоступные населенные пункты для оказания их жителям необходимой медицинской помощи. Все полученные в процессе обследования населения результаты (первичные данные лабораторных и инструментальных исследований, заключения врачей общей практики и узкопрофильных специалистов) передаются по телекоммуникационным линиям связи в ЛПУ по месту прикрепления пациентов. Пациенты, нуждающиеся в лечении, направляются в амбулаторные ЛПУ для дополнительного обследования, по результатам которого им назначается амбулаторное лечение, а в случае необходимости направляются для лечения в стационары местного подчинения или телемедицинские центры.

Пациенты, получившие в рамках стационаров или амбулаторных ЛПУ необходимую медицинскую помощь, отправляются для прохождения назначенного амбулаторного, восстановительного или послеоперационного курса лечения по месту своего жительства. В условиях близкой территориальной доступности ЛПУ такие пациенты находятся в период лечения под наблюдением врачей, периодически посещая соответствующие ЛПУ для контроля хода лечения. Врачи, наблюдающие пациентов, могут по результатам анализа состояния здоровья пациентов своевременно скорректировать ход лечения или направить их на дополнительные обследования.

Указанный способ прохождения амбулаторного или восстановительного лечения для жителей удаленных и труднодоступных населенных пунктов не всегда удобен, а в некоторых случаях практически невозможен. Снизить потребность пациентов в частых посещениях амбулаторных ЛПУ в период прохождения курса лечения можно путем применения специализированных программных средств для организации удаленного мониторинга состояния здоровья пациентов, основанных на применении современных информационно-коммуникационных тех-

нологий. В архитектуре ТМС реализация указанных функций возлагается на компоненту под названием «Персональная или домашняя медицина».

2 Назначение и функции сервиса «Персональная телемедицина»

Основное назначение сервиса «Персональная телемедицина» заключается в предоставлении врачам необходимых средств для удаленного мониторинга состояния здоровья пациентов и для проведения дистанционных консультаций. Обязательным условием для успешного применения указанных средств является наличие в распоряжении пациента компьютера или планшета с доступом к сети Интернет из населенного пункта по месту жительства этого пациента.

Суть удаленного мониторинга заключается в следующем. Пациент самостоятельно осуществляет контроль показателей состояния своего здоровья и с помощью программных средств приложения ПТМ, установленных на персональный компьютер или планшет, заносит собранные им данные в электронный дневник пациента. В этот дневник пациент или лицо, осуществляющее уход за больным, заносит также данные о выполнении назначений врача, жалобы пациента и другие сведения о его самочувствии. Подготовленные пациентом данные периодически передаются по каналам Интернет на сервер ТМС, где накапливаются и хранятся.

Врач в удобное для него время с помощью специальной программной компоненты (дистанционная приемная врача, ДПВ) запрашивает эти данные с сервера ТМС. На основании полученных данных врач осуществляет удаленное наблюдение за состоянием здоровья пациента. При необходимости врач в режиме проведения дистанционной консультации передает пациенту необходимые указания по коррекции хода лечения и может своевременно принять необходимые меры при возникновении критических ситуаций. Дистанционные консультации также выполняются в отложенном режиме, когда сформированные врачом в ходе консультации данные передаются на сервер ТМС, а пациент, получив оповещение, может ознакомиться с выданными ему назначениями и рекомендациями.

Дневник пациента может представлять собой упорядоченную по времени последовательность записей различного вида, содержащих данные о состоянии здоровья пациента. Примерный перечень регистрируемых в дневнике пациента параметров приведен ниже:

1. Температура: градусы, комментарий.
2. Пульс: частота сердечных сокращений, аритмия, комментарий.
3. Давление: систолическое (верхнее), диастолическое (нижнее), комментарий.
4. Глюкоза: уровень (ммоль/л), комментарий.
5. Вес: кг, комментарий.
6. Прием лекарств: лекарство, доза, комментарий.
7. Результаты анализов: описание, файл.

8. Результаты исследований: описание, файл.

9. Состояние и жалобы: описание.

В каждом пункте после двоеточия перечислены регистрируемые параметры и/или единицы измерения. Пациент может ввести произвольное число записей любого вида. Дневник пациента предназначен для самоконтроля и является основным источником данных для врача, осуществляющего дистанционный мониторинг состояния здоровья пациента.

Дистанционная приемная врача реализует функции запроса сведений из хранящегося на сервере ТМС дневника пациента, а также передачи пациенту дистанционных консультаций. Дистанционная приемная врача может быть реализована в виде отдельной программной компоненты либо ее функционал может быть встроен в медицинскую информационную систему (МИС) ЛПУ.

Учитывая сложность организации личных контактов врача и пациента на территории ЛПУ, функционал приложения ПТМ помимо средств ведения дневника и организации дистанционных консультаций должен обеспечивать возможность прямого общения врача и пациента посредством видео- или аудиосвязи. Инициатором сеанса видеосвязи может выступать врач или пациент. Пациент при необходимости формирует заявку на проведение сеанса связи с врачом, указывая причину вызова, желательную дату и время сеанса (приемлемый для пациента диапазон указанных параметров). Сигнал о поступлении заявки передается врачу в виде соответствующего оповещения по СМС или иным способом.

Врач в ответ на заявку пациента о необходимости контакта или по собственной инициативе отправляет пациенту уведомление о дате и времени проведения сеанса видеосвязи, которое дублируется пациенту соответствующим оповещением. В назначенное время врач и пациент, используя соответствующий функционал приложения ПТМ, устанавливают запланированный сеанс связи.

3 Пути реализации сервиса «Персональная телемедицина»

Трехсегментная модель построения ТМС [2] включает в себя три основных функциональных сегмента (стационарные телемедицинские центры, МТК и амбулаторные ЛПУ) и два технологических компонента системы — станции МТК и телекоммуникационный центр. Станции МТК обеспечивают эксплуатацию и оперативное управление мобильными комплексами, а телекоммуникационный центр ТМС предназначен для организации процессов обмена информацией между объектами основных функциональных компонентов системы при проведении обследования населения с помощью МТК и направления пациентов на лечение в стационарные телемедицинские центры.

Телекоммуникационный центр ТМС может быть также использован для размещения на его площадке программных сервисов, организующих взаимодействие приложений ПТМ и размещенных в ЛПУ приложений ДПВ. Помимо этого

на площадке телекоммуникационного центра может быть размещен видеосервер, обеспечивающий проведение сеансов видеосвязи врача и пациента.

В статье [3] приведено описание ЛКП на базе интеграционной платформы регионального уровня. Функционал ЛКП включает средства удаленного мониторинга, аналогичные изложенным в данной статье. Помимо этого в ЛКП реализованы два блока электронных услуг для пациентов:

- (1) запись пациентов на прием к врачу, на проведение лабораторных или инструментальных исследований в режиме самозаписи или по электронным направлениям;
- (2) запрос результатов услуг, предоставленных пациентам, в том числе результатов выполненных лабораторных и инструментальных исследований.

Перечисленные услуги также могут оказаться полезными пользователям сервиса ПТМ, поскольку в процессе удаленного мониторинга у врача может возникнуть необходимость направить пациента на дополнительные консультации к специалистам или на проведение новых исследований. Исходя из сказанного, целесообразно взять за основу сервиса ПТМ функционал и программные сервисы, разработанные для ЛКП [4, 5], и дополнить их средствами организации и проведения сеансов видеосвязи.

Программное обеспечение сервиса ПТМ включает в себя четыре основных компоненты:

1. Приложение ПТМ реализует функции ведения дневника пациента, получения дистанционных консультаций, талонов и направлений для посещения специалистов в ЛПУ, а также установления и ведения сеансов видеосвязи пациента и врача. Данная компонента устанавливается на компьютере или мобильном устройстве пациента.
2. Дистанционная приемная врача реализует функции доступа врача к сведениям из дневника пациента, выдачи пациенту дистанционных консультаций и направлений, установления и ведения сеансов видеосвязи с пациентом. Данная компонента может быть реализована в составе рабочего места врача МИС или в виде отдельного специализированного приложения. Действия врача, выполняемые в ходе дистанционных консультаций, должны являться частью процесса ведения электронной медицинской карты пациента, поэтому реализация функционала ДПВ в составе рабочего места МИС наиболее предпочтительна.
3. Программные сервисы ПТМ и ДПВ предназначены для организации обмена данными между приложениями ПТМ и ДПВ. В направлении от пациента к врачу указанные сервисы реализуют необходимые интерфейсы для передачи от приложений ПТМ на сервер ТМС записей дневника пациента, сохранения этих сведений в базах данных сервиса с целью их последующей передачи приложению ДПВ по запросам врачей. В направлении от врача к пациенту эти сервисы реализуют необходимые интерфейсы для передачи от

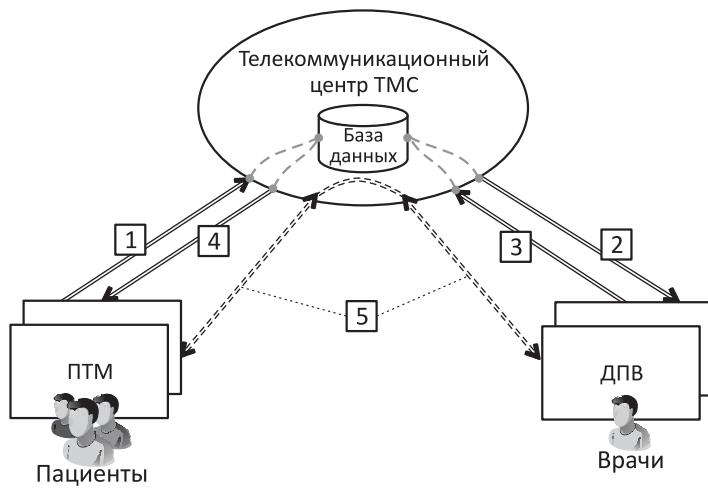


Рис. 1 Информационное взаимодействие компонентов сервиса ПТМ: 1 — передача данных дневника пациента; 2 — получение данных дневника пациента; 3 — передача дистанционных консультаций; 4 — получение дистанционных консультаций; 5 — организация видеосвязи

врача на сервер ТМС дистанционных консультаций, сохранения этих сведений в базах данных сервиса с целью их последующей передачи приложению ПТМ по запросам пациента. Сервисы ПТМ и ДПВ устанавливаются на серверах телекоммуникационного сервера ТМС [2].

4. Сервисы организации сеансов видеосвязи между пациентом (приложением ПТМ) и врачом (приложением ДПВ) реализуют интерфейсы, необходимые для их подготовки и проведения. Указанные сервисы вместе с видеосервером также должны устанавливаться на серверах телекоммуникационного сервера ТМС.

Схема информационного взаимодействия приложений ПТМ и ДПВ с использованием соответствующих программных сервисов, размещенных на площадке телекоммуникационного сервера ТМС, показана на рис. 1.

4 Организация оказания медицинской помощи населению с использованием мобильных телемедицинских комплексов и сервисов персональной телемедицины

На рис. 2 представлена схема организации процесса предоставления медицинских услуг населению удаленных и труднодоступных населенных пунктов с использованием МТК и сервиса ПТМ. По заявке амбулаторного ЛПУ, в зоне обслуживания которого находятся удаленные и труднодоступные населенные

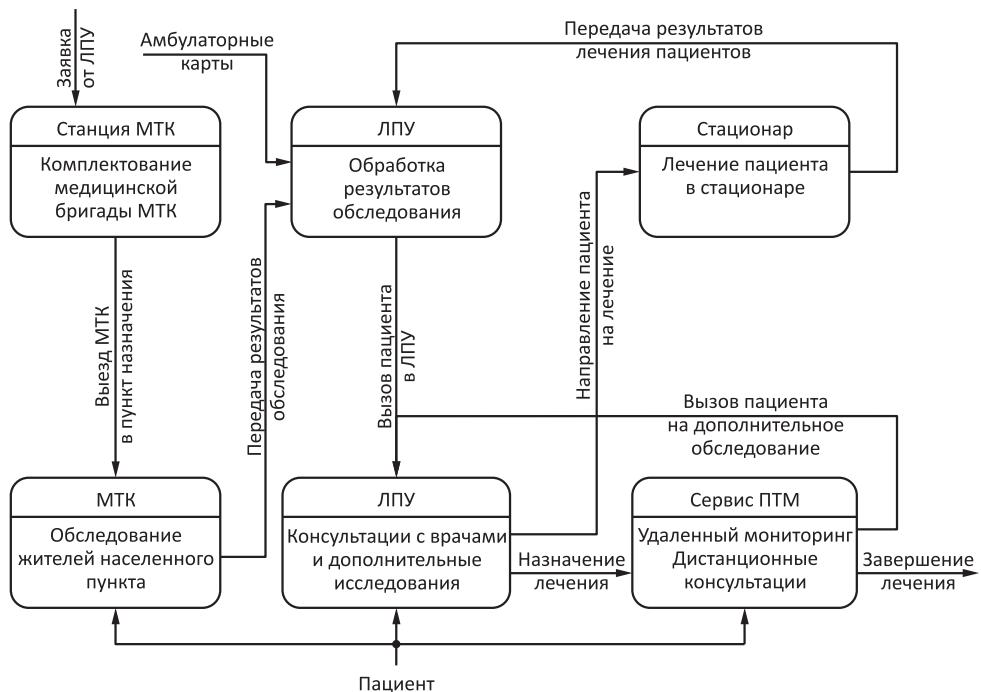


Рис. 2 Процесс оказания медицинской помощи населению с использованием МТК и ПТМ

пункты, на станции МТК подбирается один или несколько МТК, укомплектованных лабораторным и диагностическим оборудованием, удовлетворяющим требованиям заявки и размещенном на средствах доставки, способных достичь указанных в заявке населенных пунктов. Для обслуживания МТК из числа работников станции и/или сотрудников ЛПУ формируется медицинская бригада для выполнения указанных в заявке работ.

Сформированная на станции МТК медицинская бригада выдвигается в соответствующий населенный пункт и предоставляет их жителям указанные в заявках медицинские услуги. Все первичные результаты лабораторных и инструментальных исследований, полученные в процессе обследования населения, вместе с заключениями входящих в бригаду врачей передаются в ЛПУ по месту прикрепления пациентов. В ЛПУ полученные от МТК данные заносятся в амбулаторные карты пациентов и направляются для анализа специалистам соответствующих профилей.

По результатам анализа врачами ЛПУ могут быть выявлены пациенты, нуждающиеся в лечении или дополнительных обследованиях. Такие пациенты вызываются в ЛПУ для очных консультаций, по результатам которых они могут

быть направлены на лечение в стационары или же им может быть назначен курс амбулаторного лечения. После прохождения лечения в стационарах информация о проведенном лечении и рекомендации о необходимом восстановительном лечении пациентов передается в амбулаторные ЛПУ по месту прикрепления пациентов, где им назначается соответствующий курс амбулаторного лечения.

Пациенты, получившие назначения для прохождения амбулаторного лечения, отправляются по месту жительства. Врачи, назначившие пациентам курс лечения, наблюдают за ходом лечения своих пациентов в режиме удаленного мониторинга и выполняют при необходимости коррекцию курса лечения с помощью дистанционных консультаций. По результатам удаленного мониторинга пациент может быть вызван для дополнительных обследований в ЛПУ или врач может признать проведенное лечение успешным и завершить данный эпизод амбулаторного лечения.

Следует отметить, что попытки реализации сервисов телемедицины в интересах пациентов в зарубежных пилотных проектах осуществлялись неоднократно, правда без использования МТК. Примеры таких попыток изложены, например, в работах [6, 7].

5 Заключение

Рассмотрено применение МТК и сервисов ПТМ для повышения доступности и улучшения качества медицинской помощи, предоставляемой жителям удаленных и труднодоступных населенных пунктов. Определено назначение и основные функции сервиса ПТМ, описана его структура, основные компоненты и приведена схема их информационного взаимодействия. Изложены подходы к реализации сервиса ПТМ на базе сервиса и приложений ЛКП путем включения в число его функций средств организации и ведения видеосвязи врача и пациента. Приведена схема организации процесса предоставления медицинских услуг населению удаленных и труднодоступных населенных пунктов с использованием МТК и сервиса ПТМ, определены основные потоки данных между функциональными компонентами ТМС.

Литература

1. Натензон М. Я. Национальная телемедицинская система — эффективное средство повышения уровня медицинского обслуживания населения Российской Федерации. [http://arctelemed.ru/docs/Натензон%20М.Я.%20\(2\).pdf](http://arctelemed.ru/docs/Натензон%20М.Я.%20(2).pdf).
2. Илюшин Г. Я., Лиманский В. И. Оказание медицинской помощи населению с использованием мобильных телемедицинских систем // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 122–133.
3. Илюшин Г. Я., Лиманский В. И. Личный кабинет пациента на базе интеграционной платформы регионального уровня // Системы высокой доступности, 2015. Т. 11. № 3. С. 50–57.

4. Илюшин Г. Я., Лиманский В. И., Чимпоев В. Ф. Реализация взаимодействия врачей с пациентами в рамках личного кабинета пациента // Системы высокой доступности, 2016. Т. 12. № 4. С. 47–50.
5. Илюшин Г. Я., Лиманский В. И. Реализация программных сервисов личного кабинета пациента в рамках интеграционной платформы // Системы высокой доступности, 2016. Т. 12. № 4. С. 51–53.
6. Abboud J., Bozenta D., Beredjiklian P. Telemedicine consultation for patients with upper extremity disorders is reliable // Clin. Orthop. Relat. R., 2005. Vol. 435. Iss. 6. P. 250–257.
7. Aziz S. R., Zicardi V. B. Telemedicine using smartphones for oral and maxillofacial surgery consultation, communication, and treatment planning // J. Oral Maxil. Surg., 2009. Vol. 67. No. 11. P. 2505–2509.

Поступила в редакцию 13.07.17

FEATURES OF REALIZATION OF THE “PERSONAL TELEMEDICINE” SERVICE

G. Y. Ilushin and V. I. Limansky

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 possibility of application of mobile telemedicine units (MTU) and services of personal telemedicine (PTM) for increase in availability and improvement of quality of the medical care provided to inhabitants of remote and difficult to access settlements of the Russian Federation is considered. The article describes the appointment and the main functions of the PTM service, the use of which allows organizing remote monitoring of health of patients and reducing the number of visits to doctors of a medical institution by patients in the course of outpatient treatment. The approaches to realization of the PTM service on the basis of services and applications of a patient’s personal cabinet are defined. A possible scheme of organization of the process of providing medical services to the population of remote and difficult to access settlements with the use of MTU and PTM services is suggested.

Keywords: telemedicine centers; mobile telemedicine units; medical institution; telecommunication center; patient’s personal cabinet

DOI: 10.14357/08696527170414

References

1. Natenzon, M. Y. Natsional'naya telemeditsinskaya sistema — effektivnoe sredstvo povysheniya urovnya meditsinskogo obsluzhivaniya naseleniya Rossiyskoy Federatsii [National telemedicine system — an effective remedy of increase in level

- of medical attendance of the population of the Russian Federation] Available at: [http://arctelemed.ru/docs/Натензон%20М.Я.%20\(2\).pdf](http://arctelemed.ru/docs/Натензон%20М.Я.%20(2).pdf) (accessed July 13, 2017).
2. Ilushin, G. Y., and V. I. Limansky. 2017. Okazanie meditsinskoy pomoshchi naseleniyu s ispol'zovaniem mobil'nykh telemeditsinskikh system [Delivery of health care to the population using mobile telemedicine systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(1):122–133.
 3. Ilushin, G. Y., and V. I. Limansky. 2015. Lichnyy kabinet patsienta na baze integratsionnoy platformy regional'nogo urovnya [Patient personal cabinet on the base of regional integration platform]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 11(3):50–57.
 4. Ilushin, G. Y., V. I. Limansky, and V. F. Chimpoeish. 2016. Realizatsii vzaimodeystviya vrachey s patsientami v ramkakh lichnogo kabineta patsienta [About realization of interaction of doctors with patients within patient personal cabinet]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 12(4):47–50.
 5. Ilushin, G. Y., and V. I. Limansky. 2016. Realizatsiya programmnykh servisov lichnogo kabineta patsienta v ramkakh integratsionnoy platformy [Realization of programs services of the private patient cabinet within the integration platform]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 12(4):51–53.
 6. Abboud, J., D. Bozentka, and P. Beredjiklian. 2005. Telemedicine consultation for patients with upper extremity disorders is reliable. *Clin. Orthop. Relat. R.* 435(6):250–257.
 7. Aziz, S. R., and V. B. Ziccardi. 2009. Telemedicine using smartphones for oral and maxillofacial surgery consultation, communication, and treatment planning. *J. Oral Maxil. Surg.* 67(11):2505–2509.

Received July 13, 2017

Contributors

Ilushin Gennadiy Y. (b. 1947) — Candidate of Science (PhD) in technology, Head of Laboratory, 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; ilushin@ipiran.ru

Limansky Valery I. (b. 1952) — Candidate of Science (PhD) 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, Moscow, Russian Federation; vlimansky@ipiran.ru

СИТУАЦИОННАЯ ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ: МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА

А. В. Ильин¹, В. Д. Ильин²

Аннотация: Представлена модель объекта ситуационной информатизации жизнедеятельности населения, рассматриваемой как совокупность образовательных, производственных и других видов деятельности. Модель представлена предопределенным набором пространств состояний компонент жизнедеятельности, регулируемых государством (названных госпространствами). Совершенствование объекта посредством информатизации изучается как поэтапный процесс планируемых переходов от отправной ситуации к целевой. Оценка состояния объекта осуществляется путем сопоставления портретов достигнутой и целевой ситуации. 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.). Концепция и методология ситуационной информатизации рассматриваются как вклад в методологическое обеспечение реализации государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

Ключевые слова: ситуацияная информатизация; человеко-машинная среда решения задач; пространства состояний жизнедеятельности; потенциал страны; цифровая экономика

DOI: 10.14357/08696527170415

1 Введение

В наши дни растет агрессивность попыток преобразования государственных и экономических механизмов стран в инструменты интернациональных экономических элит. В среде энтузиастов компьютерных технологий ширится движение, целью которого является создание цифровых криптовалют и платежных систем, неподконтрольных государствам и банкам. Все эти «преобразователи и энтузиасты» являются сторонниками «наднациональной» организации мира и экономической модели экстерриториальной выгоды.

Особой популярностью (не только среди «сторонников») пользуются рассказы о чудесных криптовалютах и росте числа «майнинговых ферм» для добывчиков «цифрового золота». Вот цитата из такого рассказа: «The notion of a new

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

currency, maintained by the computers of users around the world, has been the butt of many jokes, but that has not stopped it from growing into a technology worth billions of dollars, supported by the hordes of followers who have come to view it as the most important new idea since the creation of the Internet. Believers from Beijing to Buenos Aires see the potential for a financial system free from banks and governments. More than just a tech industry fad, Bitcoin has threatened to decentralize some of society's most basic institutions» [1].

Обмен национальных валют на нынешние криптовалюты и применение последних в качестве платежных средств — противозаконные действия, направленные на деградацию установленных законом систем товарно-денежного обращения. На волне «цифровизации экономики» [2–6] такие действия даже ответственными государственными чиновниками не сразу распознаются как криминальные.

1.1 Научно-исследовательская работа, результаты которой представлены в статье

Ситуационная информатизация, человеко-машинная среда решения задач, пространства состояний жизнедеятельности, потенциал страны, технологии товарно-денежного обращения *нормализованного экономического механизма* (НЭМ) — эти и другие сущности, рассматриваемые в статье, исследуются в рамках научно-исследовательской работы, посвященной созданию методологии информатизации НЭМ и программной реализации комплекса экспертного планирования ресурсов на основе интернет-сервисов. 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» [7–21].

Данная статья является тематическим продолжением статьи [19].

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 Потенциал страны

Потенциал страны определяется характеристиками населения, естественной среды обитания и систем организаций 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.

Цель государственного управления — защита потенциала страны и его развитие посредством правового регулирования процессов статусной конкуренции между физическими и юридическими лицами [19].

2.1 Население

Население характеризуется (помета Δ означает слабую управляемость или неуправляемость посредством государственных воздействий; помета \circ — потенциальную управляемость):

Δ численностью, половой и возрастной структурой, рождаемостью и смертностью, плотностью на территории страны;

Δ уровнем здоровья;

Δ уровнем культуры, который характеризует отношение населения к генофондам семьи, нации и биосфера (определенное образом жизни — и прежде всего стремлением к сохранению окружающей среды и укреплению семьи, качеством питания, жилья и отдыха, интеллектуальной и физической активностью, степенью распространенности полезных гигиенических привычек и разрушающих генофонды вредных привычек); отношение к труду, образованию, творчеству (в частности, к искусству), сохранению традиций, укрепляющих семью и народ;

Δ уровнем изобретательности (определяется числом и значимостью открытых, изобретений, рационализаций; количеством и уровнем создаваемых и применяемых средств и технологий);

\circ профессиональной и квалификационной структурами трудоспособной части населения.

2.2 Среда обитания

Среда обитания населения характеризуется:

Δ размером и географическим положением территории страны, растительностью и животным миром (их промысловыми характеристиками), рельефом, климатическими условиями и подверженностью стихийным бедствиям (землетрясениям и наводнениям);

- запасами питьевой воды и воды для хозяйственных нужд;
- размерами и плодородием земель;
- Δ полезными ископаемыми (особенно источниками сырья для производства энергии и необходимых продуктов);
- Δ реками, озерами и морями (их пригодностью для промысла и судоходства).

2.3 Системы организации и обеспечения жизни

Системы организации и обеспечения жизни, включающие систему государственного управления [7] и экономический механизм страны [8–10, 14], характеризуются:

- уровнем удовлетворения спроса на воду, энергию, продукты питания, жилье, одежду; образование и медицинское обслуживание, социальное обеспечение;
- уровнем удовлетворения спроса на производственное сырье;
- уровнем адекватности экономического механизма;
- уровнем охраны окружающей среды;
- уровнем информационного обеспечения (определяется распространенностью и совершенством электронных сервисов, доступных населению в образовательных, научных, производственных и других процессах, связанных с построением и применением s-моделей систем понятий и систем знаний [20]);
- уровнем обеспечения коммуникационными средствами (связи и транспорта);
- уровнем защиты населения и среды обитания от эпидемий, стихийных бедствий и техногенных катастроф;
- размером созданного национального богатства, определяемого:
 - количеством и качеством действующих систем обеспечения энергией, водой, продовольствием;
 - национальным (представленным на государственном языке) арсеналом s-моделей систем понятий и систем знаний [20];
 - коммуникационными средствами (связь, транспорт);
 - количеством и качеством жилищ, сооружений хозяйственного, образовательного, научного, оздоровительного, оборонного и культурного назначения;
 - количеством и качеством средств производства и средств для образовательной, научной, оздоровительной, оборонной и культурной деятельности;
 - количеством и качеством средств защиты населения и среды обитания от эпидемий, стихийных бедствий и катастроф;

- обновляемыми запасами необходимых средств жизнеобеспечения населения;
- запасом драгоценных минералов и металлов;
- уровнем правового обеспечения [определяется составом и качеством действующих законов (качество закона определяется степенью соответствия регулируемому этим законом разделу процессов статусной конкуренции)];
- уровнем правоохранительного обеспечения (определяется предотвращением и раскрываемостью нарушений законов и неотвратимостью судебной ответственности);
- уровнем обороноспособности;
- уровнем обеспечения национальной безопасности (определяется уровнем готовности к обнаружению и пресечению посягательств на свободы и права граждан, потенциал и государственные институты страны).

Ряд составляющих потенциала страны имеет труднопредсказуемое изменение во времени. Это относится прежде всего к характеристикам населения и среды обитания. Причинами трудной предсказуемости служат существенная нестационарность, слабая наблюдаемость, слабооцениваемая инерционность. Потенциал страны изменяется прежде всего в результате экономической деятельности населения страны. Ключевой составляющей потенциала страны является ее трудоспособное население. Благополучие и безопасность страны зависят от его изобретательности, трудолюбия, готовности защищать страну, от его отношения к семье и стране (включая ее ресурсы). Чтобы государственные управляющие воздействия направляли поведение населения на эффективное развитие потенциала страны, необходимо иметь оперативные сведения об изменениях его контролируемых составляющих [19].

Несоответствие жизнедеятельности населения задачам защиты и развития потенциала страны приводит в итоге к одному из двух исходов:

- (1) производятся плановые изменения систем организации и управления жизнедеятельностью и правил поведения участников (граждан, корпораций и государственных учреждений);
- (2) указанное в п. 1 не реализуется, и тогда неуклонно ослабляется потенциал страны.

Второй исход делает весьма вероятным итоговое (в историческом масштабе времени) исчезновение так устроенной государственной системы.

Предложения по усовершенствованию структуры и сервисов органов государственного управления, их обоснование и способы реализации отражает *методология ситуационной информатизации жизнедеятельности*, включающая:

- 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.

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* [7, 19].

3 Жизнедеятельность населения страны

□ *Госпространство* — конкретизированное s-представление [20] заданной части жизнедеятельности населения страны. Совокупность госпространств — s-представление заданных частей объекта, используемое для формирования портreta *государственной ситуации*.

Каждое госпространство характеризуется названием и атрибутами [⊕ типами изменений состояния, управляющих воздействий и ресурсов, необходимых для их реализации (*обеспечивающих ресурсы*) ⊕].

Госпространство определено, если заданы: название (⊕ *оборонное* ⊕); типы изменений состояния; допустимые управляющие воздействия; обеспечивающие ресурсы; *системы обязательных и ориентирующих правил* [14], устанавливающие соответствие между изменениями состояния и управляющими воздействиями, между управляющими воздействиями и обеспечивающими ресурсами; правила формирования обеспечивающих ресурсов [12, 17, 21]. □

Состав госпространств формируется экспертами в соответствии со списком характеристик *населения, среды обитания и систем организации и обеспечения жизни* (см. подразд. 2.1–2.3). Каждому этапу развития потенциала страны соответствует приоритетный список госпространств (приоритет определяет ресурсную обеспеченность мониторинга и государственных регулирующих воздействий).

Мониторинг состояния объекта осуществляется с помощью *портретов ситуаций*, формируемых по результатам наблюдения совокупности *госпространств (образовательного, коммуникационного и др.)* [7].

4 Заключение

1. Целью ситуационной информатизации жизнедеятельности является организационно-технологическое совершенствование объекта, направленное на повышение защищенности и рост потенциала страны, увеличение конкурентоспособности граждан, образовательных и научных учреждений, производственных предприятий и других организаций.

2. Характеристики составляющих потенциала страны используются при формировании показателя эффективности государственного управления.
3. Составляющие жизнедеятельности населения как объекта ситуационной информатизации представлены пространствами состояний, названных *госпространствами*.
4. Предложенный подход к *ситуационной информатизации жизнедеятельности*, представленный в [19] и в данной статье, является обобщающим развитием подхода к *ситуационной информатизации государственного управления России* [7] и рассматривается как вклад в методологическое обеспечение реализации государственной программы «*Цифровая экономика Российской Федерации*».

Литература

1. Popper N. Digital gold: The untold story of bitcoin. — Allen Lane, 2015. 416 p.
2. Tapscott D. The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence. — New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996. 342 p.
3. 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>.
4. 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>.
5. G20 digital economy development and cooperation initiative // G20 Summit, September 5, 2016. <http://en.kremlin.ru/supplement/5111>.
6. Цифровая экономика Российской Федерации: Программа, 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>.
7. Ильин В. Д. Основания ситуационной информатизации. — М.: Наука, Физматлит, 1996. 180 с.
8. Ильин В. Д. Модель нормализованной экономики (НЭк-модель): основы концепции // Управление большими системами, 2009. Вып. 25. С. 116–138.
9. Ильин А. В., Ильин В. Д. S-экономика: механизм хозяйствования в эпоху Интернета. — М.: ИПИ РАН, 2011. 105 с.
10. Ilyin V. D. S-economics. — Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences, 2012. 54 p.
11. 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.
12. Ильин А. В. Интернет-сервис планирования расходов // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 2. С. 111–122.
13. 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.
14. Ильин А. В., Ильин В. Д. Информатизация экономического механизма. — М.: ИПИ РАН, 2015. 130 с.

15. Ильин В. Д. Нормализованные деньги в системе имущественных статусов // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 206–217.
16. Ильин В. Д. Нормализация банковских онлайн-сервисов // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 2. С. 147–157.
17. Ильин А. В., Ильин В. Д. Создание человеко-машинной среды решения задач // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 149–161.
18. Ilyin A. V., Ilyin 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.
19. Ильин А. В., Ильин В. Д. Основы концепции ситуационной информатизации жизнедеятельности // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 3. С. 188–201.
20. Ильин В. Д. Символьное моделирование // Большая Российская энциклопедия. Электронная версия, 2017. https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/4010980.
21. Ильин А. В. Интернет-сервисы планирования ресурсов, 2017. <https://www.res-plan.com>.

Поступила в редакцию 15.09.17

SITUATIONAL INFORMATIZATION OF POPULATION ACTIVITIES: THE MODEL OF THE OBJECT

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 describes the model of the population activities considered as an aggregate of education, production, and other kinds of activity. The model is represented by the predefined set of “state spaces” describing the components of population activities regulated by state. Improvement of the object through informatization is studied as a phased process of planned transitions from the starting situation to the target one. The object state is assessed by comparing the portraits of the target and 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 concept and the methodology of situational informatization are considered as contribution to implementation of the state program “Digital Economy of the Russian Federation.”

Keywords: situational informatization; human-machine environment for problem solving; spaces of statuses of the population activities; country’s potential; digital economy

DOI: 10.14357/08696527170415

References

1. Popper, N. 2015. *Digital gold: The untold story of bitcoin*. Allen Lane. 416 p.
2. Tapscott, D. 1996. *The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence*. New York, NY: McGraw-Hill. 342 p.
3. 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 November 7, 2017).
4. Oxford economics. 2015. *The new digital economy: How it will transform business*. 2015. Available at: <http://www.pwc.com/mt/en/publications/assets/the-new-digital-economy.pdf> (accessed November 7, 2017).
5. G20 Summit. 2016. G20 digital economy development and cooperation initiative. Available at: <http://en.kremlin.ru/supplement/5111> (accessed November 7, 2017).
6. Russian Government. July 28, 2017. Programma "Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii" utverzhdennoy rasporyazheniem No. 1632-r [The program "Digital Economy of the Russian Federation" approved by Government Order No. 1632-r]. 87 p. Available at: <http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2017/07/programma-tsifrov-econ.pdf> (accessed November 7, 2017).
7. Ilyin, V. D. 1996. *Osnovaniya situatsionnoi informatizatsii* [Fundamentals of situational informatization]. Moscow: Nauka, Fizmatlit. 180 p.
8. 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.
9. 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.
10. Ilyin, V. D. 2012. *S-economics*. Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 54 p.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2015. *Informatizatsiya ekonomiceskogo mekhanizma* [Informatization of the economic mechanism]. Mpscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 130 p.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. 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.
19. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2017. Osnovy kontseptsii situatsionnoy informatizatsii zhiznedeyatel'nosti [Basics of the concept of situational informatization of population activities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(3):188–201.
20. Ilyin, V. D. 2017. Simvol'noe modelirovanie [Symbolic modeling]. *Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya. Elektronnaya versiya* [The Great Russian encyclopedia. Electronic version]. Available at: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/4010980 (accessed November 7, 2017).
21. Ilyin, A. V. 2017. Online resource planning services. Available at: <https://www.res-plan.com> (accessed November 7, 2017).

Received September 15, 2017

Contributors

Ilyin Alexander V. (b. 1975)— Candidate of Science (PhD) 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, Russian Federation; vdilyin@ipiran.ru

О Б А В Т О Р АХ

Адамович Игорь Михайлович (р. 1934) — кандидат технических наук, заведующий отделом проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Бегишев Вячеслав Олегович (р. 1988) — аспирант кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов

Волков Олег Игоревич (р. 1964) — ведущий программист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Зацаринный Александр Алексеевич (р. 1951) — доктор технических наук, заместитель директора 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

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

Илюшин Геннадий Яковлевич (р. 1947) — кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Калинина Ксения Алексеевна (р. 1990) — аспирант Института прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук

Колесников Александр Васильевич (р. 1948) — доктор технических наук, профессор кафедры телекоммуникаций Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта; старший научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Коновалов Михаил Григорьевич (р. 1950) — доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Королёв Вадим Иванович (р. 1943) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и Финансового университета при Правительстве Российской Федерации

Кружков Михаил Григорьевич (р. 1975) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кудрявцев Алексей Андреевич (р. 1978) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Лиманский Валерий Иванович (р. 1952) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Листопад Сергей Викторович (р. 1984) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Лопылова Елена Юрьевна (р. 1960) — научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Мартынянов Евгений Александрович (р. 1991) — аспирант факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Молчанов Дмитрий Александрович (р. 1978) — кандидат технических наук, доцент Российского университета дружбы народов

Морозов Евсей Викторович (р. 1947) — доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук; профессор Петрозаводского государственного университета

Палионная София Игоревна (р. 1995) — студентка кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Пименова Екатерина Юрьевна (р. 1993) — выпускник магистратуры Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

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

Ревизников Дмитрий Леонидович (р. 1961) — доктор физико-математических наук, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Самуйлов Андрей Константинович (р. 1988) — кандидат физико-математических наук, доцент Российского университета дружбы народов

Самуйлов Константин Евгеньевич (р. 1955) — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей Российской университета дружбы народов; старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Семенов Сергей Александрович (р. 1986) — инженер Московского авиационного института (национального исследовательского 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

Сучков Александр Павлович (р. 1954) — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Шнурков Петр Викторович (р. 1953) — кандидат физико-математических наук, доцент Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2017 г.

	№	Стр.
Адамович И. М., Волков О. И. Влияние ошибок пользователей на динамику качества семантической сети	4	150–163
Адамович И. М., Волков О. И. Об одном подходе к моделированию процесса развития семантической сети	2	143–154
Алиев А. А. см. Рзаев Р. Р.		
Бегишев В. О., Самуйлов А. К., Молчанов Д. А., Самуйлов К. Е. Стратегии распределения радиоресурсов в гетерогенных сетях с трафиком narrow-band IoT	4	64–79
Бочкарев А. М., Софронов И. Л., Стрижов В. В. Порождение эксперто-интерпретируемых моделей для прогноза проницаемости горной породы	3	74–87
Волков О. И. см. Адамович И. М.		
Волков О. И. см. Адамович И. М.		
Волович К. И., Зацаринный А. А., Кондрашев В. А., Шабанов А. П. О некоторых подходах к представлению научных исследований как облачного сервиса	1	73–84
Глущенко Е. И. см. Сахибгареева М. В.		
Головин С. А., Зацаринный А. А., Козлов С. В. Научно-методические подходы к совершенствованию нормативной базы для создания и развития информационно-телекоммуникационных систем	2	98–112
Горшенин А. К., Данилович Е. С., Хромов Д. Р. Система управления обучением ELIS. Архитектурные решения	2	60–69
Горшенин А. К., Данилович Е. С., Хромов Д. Р. Система управления обучением ELIS. Пользовательский интерфейс и функциональные возможности	2	70–84
Горшенин А. К., Кузьмин В. Ю. Портал MSM Tools как гетерогенный вычислительный сервис	1	60–72
Грушо А. А., Забежайло М. И., Зацаринный А. А., Николаев А. В., Писковский В. О., Тимонина Е. Е. Классификация ошибочных состояний в распределенных вычислительных системах и источники их возникновения	2	29–40
Грушо А. А., Забежайло М. И., Смирнов Д. В., Тимонина Е. Е. О комплексной аутентификации	3	4–11
Грушо А. А., Терёхина И. Ю. Анализ непротиворечивости реконфигурации программно-конфигурируемой сети	3	12–22
Губайдуллин И. М. см. Еникеев М. Р.		
Данилович Е. С. см. Горшенин А. К.		

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2017 г.

№	Стр.
Данилович Е. С. см. Горшенин А. К.	
Дулин С. К., Дулина Н. Г., Косарик В. В., Никишин Д. А.	
Макет интероперабельной информационно-аналитической системы для обеспечения пространственного и семантического поиска и анализа геоданных	1 46–59
Дулин С. К., Дулина Н. Г., Якушев Д. А. Геоинформационный синтез пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта	3 126–144
Дулина Н. Г. см. Дулин С. К.	
Дулина Н. Г. см. Дулин С. К.	
Егоров В. Б. Некоторые неявные вопросы сетевой виртуализации	3 88–98
Егоров В. Б. Способ организации обработки пакетов в интегрированных сетевых процессорах	1 108–121
Еникеев М. Р., Губайдуллин И. М., Малеева М. А. Информационно-вычислительная аналитическая система для оценки и прогнозирования коррозионных процессов на поверхности стали и алюминия	3 155–170
Еникеева Л. В. см. Сахибгареева М. В.	
Забежайло М. И. см. Грушо А. А.	
Забежайло М. И. см. Грушо А. А.	
Захарова Т. В., Сливкина А. В. Прогнозирование развития поздних послеоперационных осложнений по результатам дискриминантного и корреляционного анализа характеристик гликемии в раннем послеоперационном периоде	3 63–73
Зацаринный А. А., Королёв В. И. Особенности подготовки информационно-аналитического продукта средствами сегментированного ситуационного центра	4 122–131
Зацаринный А. А. см. Волович К. И.	
Зацаринный А. А. см. Головин С. А.	
Зацаринный А. А. см. Грушо А. А.	
Зацман И. М., Кружков М. Г., Лощилова Е. Ю. Методы анализа частотности моделей перевода коннекторов и обратимость генерализации статистических данных	4 164–176
Зацман И. М., Мамонова О. С., Щурова А. Ю. Обратимость и алтернативность генерализации моделей перевода коннекторов в параллельных текстах	2 125–142
Зацман И. М. см. Минин В. А.	
Зейфман А. И., Коротышева А. В., Сатин Я. А., Киселева К. М., Разумчик Р. В., Королев В. Ю., Шоргин С. Я.	
Оценки погрешности аппроксимации для марковских систем обслуживания, описываемых процессами рождения и гибели с дополнительными переходами	3 37–51

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2017 г.

	№ Стр.
Ильин А. В., Ильин В. Д. Основы концепции ситуационной информатизации жизнедеятельности	3 188–201
Ильин А. В., Ильин В. Д. Ситуационная информатизация жизнедеятельности: модель объекта	4 187–196
Ильин В. Д. Информатика: предмет и области исследований	1 167–177
Ильин В. Д. Табс-представление задач и задачных графов	2 155–169
Ильин В. Д. см. Ильин А. В.	
Ильин В. Д. см. Ильин А. В.	
Илюшин Г. Я., Лиманский В. И. Оказание медицинской помощи населению с использованием мобильных телемедицинских систем	1 122–133
Илюшин Г. Я., Лиманский В. И. Особенности реализации сервиса «Персональная телемедицина»	4 177–186
Калинина К. А., Морозов Е. В. О рандомизации в методе группового среднего при оценивании эффективной пропускной способности высокоответственных систем	4 37–53
Кантор О. Г., Спивак С. И., Талипова Р. Р. Параметрическая идентификация математических моделей химической кинетики	3 145–154
Кириков И. А., Колесников А. В., Листопад С. В., Румовская С. Б. Метод измерения эффекта синергии в гибридных интеллектуальных многоагентных системах	3 99–111
Киселева К. М. см. Зейфман А. И.	
Козлов С. В. см. Головин С. А.	
Колесников А. В., Листопад С. В. Алгоритм синтеза функциональных гибридных интеллектуальных систем с гетерогенным визуальным полем	3 112–125
Колесников А. В., Листопад С. В. Архитектура инструментального средства разработки функциональных гибридных интеллектуальных систем с гетерогенным визуальным полем	4 95–108
Колесников А. В. см. Кириков И. А.	
Кондрашев В. А. см. Волович К. И.	
Коновалов М. Г., Разумчик Р. В. Об управлении размером очереди в системе с одним сервером	4 4–15
Королев В. Ю. см. Зейфман А. И.	
Королёв В. И. см. Зацаринный А. А.	
Коротышева А. В. см. Зейфман А. И.	
Косарик В. В. см. Дулин С. К.	
Кружков М. Г. см. Зацман И. М.	
Кудрявцев А. А., Палионная С. И. Байесовская рекуррентная модель роста надежности: априорные плотности полиномиального вида	4 54–63

	№	Стр.
Кудрявцев А. А., Шестаков О. В., Федюшин И. А. Локальная реконструкция участков томографических изображений в параллельной и веерной схемах сканирования	3	52–62
Кузьмин В. Ю. см. Горшенин А. К.		
Лебедев А. В. Статистический анализ максимум-линейных случайных процессов	2	16–28
Лиманский В. И. см. Илюшин Г. Я.		
Лиманский В. И. см. Илюшин Г. Я.		
Листопад С. В. см. Кириков И. А.		
Листопад С. В. см. Колесников А. В.		
Листопад С. В. см. Колесников А. В.		
Лощицова Е. Ю. см. Зацман И. М.		
Лукьянов Г. В., Никишин Д. А. Прикладные аспекты когнитивного моделирования при проектировании сложных информационных систем	1	134–154
Малеева М. А. см. Еникеев М. Р.		
Мамонова О. С. см. Зацман И. М.		
Мартынянов Е. А. Возможность выявления инсайдера статистическими методами	2	41–47
Мартынянов Е. А. Запреты вероятностных мер в задаче поиска инсайдера	4	144–149
Мартынянов Е. А. Имитационная модель поиска инсайдера статистическими методами	2	48–59
Минин В. А., Зацман И. М., Хавансков В. А., Шубников С. К. Макетирование информационной системы для вычисления индикаторов интенсивности переноса научных знаний в сферу технологий	3	171–187
Молчанов Д. А. см. Бегишев В. О.		
Морозов Е. В. см. Калинина К. А.		
Никишин Д. А. см. Дулин С. К.		
Никишин Д. А. см. Лукьянов Г. В.		
Николаев А. В. см. Грушко А. А.		
Палионная С. И. см. Кудрявцев А. А.		
Пименова Е. Ю. см. Шнурков П. В.		
Писковский В. О. см. Грушко А. А.		
Плеханов Л. П. Синтез самосинхронных комбинационных секций функциональным методом	2	85–97
Разумчик Р. В. см. Зейфман А. И.		
Разумчик Р. В. см. Коновалов М. Г.		
Ревизников Д. Л. см. Семенов С. А.		
Рзаев Р. Р., Алиев А. А. Оценка кредитоспособности физического лица на основе нечеткого анализа его платежеспособности	3	202–218

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2017 г.

	№ Стр.
Румовская С. Б. см. Кириков И. А.	
Самуилов А. К. см. Бегишев В. О.	
Самуилов К. Е. см. Бегишев В. О.	
Сатин Я. А. см. Зейфман А. И.	
Сахибгареева М. В., Глущенко Е. И., Еникеева Л. В., Шарипова Г. М. Облачный сервис решения задач химической кинетики с использованием параллельных вычислений	1 155–166
Семенов С. А., Ревизников Д. Л. Эффективное использование программируемых графических процессоров в задачах молекулярно-динамического моделирования	4 109–121
Синицын И. Н. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с интегральными нелинейностями (I)	2 3–15
Синицын И. Н. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с интегральными нелинейностями (II)	3 23–36
Синицын И. Н. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с интегральными нелинейностями (III)	4 16–36
Синицын И. Н. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с эллиптическими нелинейностями	1 3–19
Синицын И. Н. Параметрическое аналитическое моделирование процессов в стохастических системах, не разрешенных относительно производных	1 20–45
Сливкина А. В. см. Захарова Т. В.	
Смирнов Д. В. см. Грушо А. А.	
Сомин Н. В. см. Шарнин М. М.	
Софронов И. Л. см. Бочкарев А. М.	
Спивак С. И. см. Кантор О. Г.	
Стрижков В. В. см. Бочкарев А. М.	
Сучков А. П. Информационная структура угроз национальной безопасности	2 113–124
Сучков А. П. Классификация уязвимостей интегрированных систем управления на ранних стадиях жизненного цикла	4 132–143
Сучков А. П. Полнофункциональный процессный подход к реализации систем ситуационного управления	1 85–99
Талипова Р. Р. см. Кантор О. Г.	
Терёхина И. Ю. см. Грушо А. А.	
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.	
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.	
Федюшин И. А. см. Кудрявцев А. А.	

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2017 г.

№ Стр.

- Хавансков В. А.** см. Минин В. А.
Хромов Д. Р. см. Горшенин А. К.
Хромов Д. Р. см. Горшенин А. К.
Шабанов А. П. см. Волович К. И.
Шарипова Г. М. см. Сахибгареева М. В.
Шарнин М. М., Сомин Н. В. Об основных типах связанности
между текстовыми документами 1 100–107
Шестаков О. В. см. Кудрявцев А. А.
Шнурков П. В., Пименова Е. Ю. Оптимальное управление
запасом непрерывного продукта в схеме регенерации с де-
терминированной задержкой поставки и периодом реального
пополнения 4 80–94
Шоргин С. Я. см. Зейфман А. И.
Шубников С. К. см. Минин В. А.
Щурова А. Ю. см. Зацман И. М.
Якушев Д. А. см. Дулин С. К.

2017 AUTHOR INDEX

No.	Page
Adamovich I. M. and Volkov O. I. An approach to modeling the semantic net evolution	2 143–154
Adamovich I. M. and Volkov O. I. The influence of user errors on semantic net quality dynamics	4 150–163
Aliyev A. A. see Rzayev R. R.	
Begishev V. O., Samuylov A. K., Molchanov D. A., and Samouylov K. E. Radio resource distribution strategies in heterogeneous networks with Narrow-Band IoT traffic	4 64–79
Bochkarev A. M., Sofronov I. L., and Strijov V. V. Generation of expertly-interpreted models for prediction of core permeability	3 74–87
Charnine M. M. and Somin N. V. On the main types of relatedness between text documents	1 100–107
Danilovich E. S. see Gorshenin A. K.	
Danilovich E. S. see Gorshenin A. K.	
Dulin S. K., Dulina N. G., Kosarik V. V., and Nikishin D. A. Layout of an interoperable information-analytical system for spatial and semantic search and analysis of geodata	1 46–59
Dulin S. K., Dulina N. G., and Yakushev D. A. Geoinformation fusion of spatial data of the railway transport infrastructure	3 126–144
Dulina N. G. see Dulin S. K.	
Dulina N. G. see Dulin S. K.	
Egorov V. B. A method of packet processing in integrated network processors	1 108–121
Egorov V. B. Some implicit issues of network virtualization	3 88–98
Enikeev M. R., Gubaydullin I. M., and Maleeva M. A. Information computation and analytical system of estimation and forecasting of corrosion processes on the surface of steel and aluminum	3 155–170
Enikeeva L. V. see Sakhibgareeva M. V.	
Fedushin I. A. see Kudryavtsev A. A.	
Glushchenko E. I. see Sakhibgareeva M. V.	
Golovin S. A., Zatsarinnyy A. A., and Kozlov S. V. On scientific and methodological approaches to regulatory base enhancement for information and telecommunication systems creation and development	2 98–112
Gorshenin A. K., Danilovich E. S., and Khromov D. R. Learning management system ELIS. Architecture solutions	2 60–69

No.	Page
Gorshenin A. K., Danilovich E. S., and Khromov D. R. Learning management system ELIS. User interface and functional capabilities	2 70–84
Gorshenin A. K. and Kuzmin V. Yu. MSM Tools as a heterogeneous computing service	1 60–72
Grusho A. A. and Teryokhina I. Yu. Consistency analysis of software-defined networks reconfiguration	3 12–22
Grusho A. A., Zabezhailo M. I., Smirnov D. V., and Timonina E. E. About complex authentication	3 4–11
Grusho A. A., Zabezhailo M. I., Zatsarinnyy A. A., Nikolaev A. V., Piskovski V. O., and Timonina E. E. Erroneous states classification in distributed computing systems and sources of their occurrence	2 29–40
Gubaydullin I. M. see Enikeev M. R.	
Havanskov V. A. see Minin V. A.	
Ilushin G. Y. and Limansky V. I. Delivery of health care to the population using mobile telemedicine systems	1 122–133
Ilushin G. Y. and Limansky V. I. Features of realization of the “Personal Telemedicine” service	4 177–186
Ilyin A. V. and Ilyin V. D. Basics of the concept of situational informatization of population activities	3 188–201
Ilyin A. V. and Ilyin V. D. Situational informatization of population activities: The model of the object	4 187–196
Ilyin V. D. Informatics: Research subject and areas	1 167–177
Ilyin V. D. Tabs-representation of tasks and task graphs	2 155–169
Ilyin V. D. see Ilyin A. V.	
Ilyin V. D. see Ilyin A. V.	
Kalinina K. A. and Morozov E. V. Effective bandwidth estimation of highly responsible systems by the randomized batch mean method	4 37–53
Kantor O. G., Spivak S. I., and Talipova R. R. Parametric identification of mathematical models of chemical kinetics	3 145–154
Khromov D. R. see Gorshenin A. K.	
Khromov D. R. see Gorshenin A. K.	
Kirikov I. A., Kolesnikov A. V., Listopad S. V., and Rumovskaya S. B. Method for measuring synergy effect in hybrid intelligent multiagent systems	3 99–111
Kiseleva K. M. see Zeifman A. I.	
Kolesnikov A. V. and Listopad S. V. Algorithm for synthesis of functional hybrid intelligent systems with a heterogeneous visual field	3 112–125

No.	Page
Kolesnikov A. V. and Listopad S. V. Architecture of the tool for developing the functional hybrid intelligent systems with a heterogeneous visual field	4 95–108
Kolesnikov A. V. see Kirikov I. A.	
Kondrashev V. A. see Volovich K. I.	
Konovalov M. G. and Razumchik R. V. Controlling queue size in a single server system	4 4–15
Korolev V. I. see Zatsarinny A. A.	
Korolev V. Yu. see Zeifman A. I.	
Korotysheva A. V. see Zeifman A. I.	
Kosarik V. V. see Dulin S. K.	
Kozlov S. V. see Golovin S. A.	
Kruzhkov M. G. see Zatsman I. M.	
Kudryavtsev A. A. and Palionnaia S. I. Bayesian recurrent model of reliability growth: <i>A priori</i> densities of polynomial type	4 54–63
Kudryavtsev A. A., Shestakov O. V., and Fedushin I. A. Local reconstruction of tomographic images in parallel and fan-beam scanning schemes	3 52–62
Kuzmin V. Yu. see Gorshenin A. K.	
Lebedev A. V. Statistical analysis of max-linear processes	2 16–28
Limansky V. I. see Ilushin G. Y.	
Limansky V. I. see Ilushin G. Y.	
Listopad S. V. see Kirikov I. A.	
Listopad S. V. see Kolesnikov A. V.	
Listopad S. V. see Kolesnikov A. V.	
Loshchilova E. Ju. see Zatsman I. M.	
Lukyanov G. V. and Nikishin D. A. Applied aspects of modeling of information systems	1 134–154
Maleeva M. A. see Enikeev M. R.	
Mamonova O. S. see Zatsman I. M.	
Martyanov E. A. Bans of probability measures in the problem of insider detection	4 144–149
Martyanov E. A. Imitation model of insider detection by statistical techniques	2 48–59
Martyanov E. A. Possibility of insider detection by statistical techniques	2 41–47
Minin V. A., Zatsman I. M., Havanskov V. A., and Shubnikov S. K. Prototyping an information system for the calculation of indicators of the intensity of the transfer of scientific knowledge in the field of technology	3 171–187
Molchanov D. A. see Begishev V. O.	
Morozov E. V. see Kalinina K. A.	

No.	Page
Nikishin D. A. see Dulin S. K.	
Nikishin D. A. see Lukyanov G. V.	
Nikolaev A. V. see Grusho A. A.	
Palionnaia S. I. see Kudryavtsev A. A.	
Pimenova E. Yu. see Shnurkov P. V.	
Piskovski V. O. see Grusho A. A.	
Plekhanov L. P. Synthesis of self-timed combinational sections using the functional method	2 85–97
Razumchik R. V. see Konovalov M. G.	
Razumchik R. V. see Zeifman A. I.	
Reviznikov D. L. see Semenov S. A.	
Rumovskaya S. B. see Kirikov I. A.	
Rzayev R. R. and Aliyev A. A. Credit rating of a physical person based on fuzzy analysis of his/her solvency	3 202–218
Sakhibgareeva M. V., Glushchenko E. I., Enikeeva L. V., and Sharipova G. M. Cloud service for solving chemical kinetics problems using parallel computing	1 155–166
Samouylov K. E. see Begishev V. O.	
Samouylov A. K. see Begishev V. O.	
Satin Ya. A. see Zeifman A. I.	
Semenov S. A. and Reviznikov D. L. Effective use of programmable graphics processing units in problems of molecular dynamics simulation	4 109–121
Shabanov A. P. see Volovich K. I.	
Sharipova G. M. see Sakhibgareeva M. V.	
Shchurova A. Yu. see Zatsman I. M.	
Shestakov O. V. see Kudryavtsev A. A.	
Shnurkov P. V. and Pimenova E. Yu. Optimal inventory control of continuous product in regeneration theory with determinate delay of the delivery and the period of real replenishment	4 80–94
Shorgin S. Ya. see Zeifman A. I.	
Shubnikov S. K. see Minin V. A.	
Sinitsyn I. N. Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with elliptic nonlinearities	1 3–19
Sinitsyn I. N. Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with integral nonlinearities (I)	2 3–15
Sinitsyn I. N. Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with integral nonlinearities (II)	3 23–36
Sinitsyn I. N. Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with integral nonlinearities (III)	4 16–36
Sinitsyn I. N. Parametric analytical modeling of wide band processes in stochastic systems with unsolved derivatives	1 20–45
Slivkina A. V. see Zakharova T. V.	

	No.	Page
Smirnov D. V. see Grusho A. A.		
Sofronov I. L. see Bochkarev A. M.		
Somin N. V. see Charnine M. M.		
Spivak S. I. see Kantor O. G.		
Strijov V. V. see Bochkarev A. M.		
Suchkov A. P. A fully functional process-based approach to the implementation of situational control systems	1	85–99
Suchkov A. P. Classification of vulnerabilities of integrated control systems at the early stages of life cycle	4	132–143
Suchkov A. P. The information structure of threats to national security	2	113–124
Talipova R. R. see Kantor O. G.		
Teryokhina I. Yu. see Grusho A. A.		
Timonina E. E. see Grusho A. A.		
Timonina E. E. see Grusho A. A.		
Volkov O. I. see Adamovich I. M.		
Volkov O. I. see Adamovich I. M.		
Volovich K. I., Zatsarinnyy A. A., Kondrashev V. A., and Shabanov A. P. Scientific research as a cloud service	1	73–84
Yakushev D. A. see Dulin S. K.		
Zabezhailo M. I. see Grusho A. A.		
Zabezhailo M. I. see Grusho A. A.		
Zakharova T. V. and Slivkina A. V. Prediction of late post-operative complications based on the results of discriminant and correlation analyses of the early postoperative glycemia characteristics	3	63–73
Zatsarinny A. A. and Korolev V. I. Technological service preparation of information and analytical products by means of a segmented situational center	4	122–131
Zatsarinnyy A. A. see Golovin S. A.		
Zatsarinnyy A. A. see Grusho A. A.		
Zatsarinnyy A. A. see Volovich K. I.		
Zatsman I. M., Kruzhkov M. G., and Loshchilova E. Ju. Methods of frequency analysis of connectives translations and reversibility of statistical data generalization	4	164–176
Zatsman I. M., Mamonova O. S., and Shchurova A. Yu. Reversibility and alternativeness of generalization of connectives translations models in parallel texts	2	125–142
Zatsman I. M. see Minin V. A.		
Zeifman A. I., Korotysheva A. V., Satin Ya. A., Kiseleva K. M., Razumchik R. V., Korolev V. Yu., and Shorgin S. Ya. Truncation bounds for a class of inhomogeneous birth and death queueing models with additional transitions	3	37–51

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 рукописи 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).

Редакция 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 редакции о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам.

Редакция может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей высыпается авторам для просмотра. Замечания к редактуре 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 (ссылки 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 primenением hidrorazryva 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 povysheniya 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, сборника):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonants, 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:

Latyrov, 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 modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyy tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. D.Sc. Diss. Moscow. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya informacionnogo 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 kolичества 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 Publs. 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 golovkoj 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 primenением гидроразрыва пласта [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya 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 turbogeneratorov 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 slovarya informacionnogo 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 golovkoj 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 (СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ)

SCIENTIFIC JOURNAL

Volume 27 No. 4 Year 2017

Editor-in-Chief and Chair of Editorial Council
Academician I. A. Sokolov

I N T H I S I S S U E:

CONTROLLING QUEUE SIZE IN A SINGLE SERVER SYSTEM <i>M. G. Konovalov and R. V. Razumchik</i>	4
ANALYTICAL MODELING OF NORMAL PROCESSES IN STOCHASTIC SYSTEMS WITH INTEGRAL NONLINEARITIES (III) <i>I. N. Sinitsyn</i>	16
EFFECTIVE BANDWIDTH ESTIMATION OF HIGHLY RESPONSIBLE SYSTEMS BY THE RANDOMIZED BATCH MEAN METHOD <i>K. A. Kalinina and E. V. Morozov</i>	37
BAYESIAN RECURRENT MODEL OF RELIABILITY GROWTH: A PRIORI DENSITIES OF POLYNOMIAL TYPE <i>A. A. Kudryavtsev and S. I. Palionnaia</i>	54
RADIO RESOURCE DISTRIBUTION STRATEGIES IN HETEROGENEOUS NETWORKS WITH NARROW-BAND IoT TRAFFIC <i>V. O. Begishev, A. K. Samuylov, D. A. Molchanov, and K. E. Samouylov</i>	64
OPTIMAL INVENTORY CONTROL OF CONTINUOUS PRODUCT IN REGENERATION THEORY WITH DETERMINATE DELAY OF THE DELIVERY AND THE PERIOD OF REAL REPLENISHMENT <i>P. V. Shnurkov and E. Yu. Pimenova</i>	80
ARCHITECTURE OF THE TOOL FOR DEVELOPING THE FUNCTIONAL HYBRID INTELLIGENT SYSTEMS WITH A HETEROGENEOUS VISUAL FIELD <i>A. V. Kolesnikov and S. V. Listopad</i>	95
EFFECTIVE USE OF PROGRAMMABLE GRAPHICS PROCESSING UNITS IN PROBLEMS OF MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION <i>S. A. Semenov and D. L. Reviznikov</i>	109
TECHNOLOGICAL SERVICE PREPARATION OF INFORMATION AND ANALYTICAL PRODUCTS BY MEANS OF A SEGMENTED SITUATIONAL CENTER <i>A. A. Zatsarinny and V. I. Korolev</i>	122