

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

Учредитель:

**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 В. Ротарь (V. Rotar, San-Diego, USA)

профессор М. Финкельштейн (M. Finkelstein, Bloemfontein, South Africa)

профессор В. Хофкирхнер (W. Hofkirchner, Wien, Austria)

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.ф.-м.н. А. И. Зейфман

проф., д.т.н. В. Д. Ильин

проф., д.т.н. К. К. Колин

проф., д.ф.-м.н. В. Ю. Королев

д.ф.-м.н. Р. В. Разумчик

д.ф.-м.н. В. И. Сеницын

проф., д.т.н. И. Н. Сеницын

проф., д.ф.-м.н. В. Г. Ушаков

д.ф.-м.н. А. К. Горшенин — отв. секретарь

к.ф.-м.н. С. А. Христочевский

Редакция

к.ф.-м.н. Е. Н. Арутюнов

С. Н. Стригина

© Федеральный исследовательский центр «Информатика
и управление» Российской академии наук, 2024

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» ВИНИТИ
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 34 № 4 Год 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Новый подход к реализации логических функций в программируемых логических интегральных схемах С. Ф. Тюрин, С. И. Советов, Ю. А. Степченков, Ю. Г. Дьяченко	3
Дискретное условно-оптимальное оценивание в неявных наблюдаемых стохастических системах И. Н. Синицын	16
Оптимизация порогового параметра RED-подобного алгоритма управления очередью модели G/M/1 Я. М. Агаларов	31
Разработка сверточного алгоритма для расчета стационарных характеристик ресурсных систем с временем обслуживания, зависящим от объема требований А. И. Назарьин, Э. С. Сопин, С. Я. Шоргин	48
Кооперативные самонастраивающиеся гибридные интеллектуальные системы персонализированной диагностики и прогнозирования в медицине: концепция, подход к разработке, декомпозиция проблемы С. Б. Румовская, Ф. Н. Парамзин	59
Развитие структуры надкорпусных баз данных А. А. Гончаров	73
Теория S-символов: развитие и применение В. Д. Ильин	85
Проблемы целеполагания в аппаратно-программном комплексе «Безопасный город» А. А. Зацаринный, А. П. Сучков	97
Программа РАН «Оптический компьютер» и ее последствия В. П. Торчигин	108
On an approach to data analysis and visualization in the domain of employee–organization relationships Kishankumar Bhimani and Khushbu Saradva	115
Об авторах	137
Авторский указатель за 2024 г.	139
2024 Author Index	144
Правила подготовки рукописей статей	148
Requirements for manuscripts	152

НОВЫЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ ЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ В ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

С. Ф. Тюрин¹, С. И. Советов², Ю. А. Степченко³, Ю. Г. Дьяченко⁴

Аннотация: Рассматривается расширение функциональных возможностей логического элемента LUT (Look up Table) программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа FPGA (Field-Programmable Gate Array). Предлагаемый метод использует неактивную половину дерева транзисторов элемента. В статье исследуются также реализация элемента на одну переменную 1-LUT, который реализует логическую функцию одновременно с дешифрацией (DC, decoding) переменной, и его использование для создания LUT на n переменных n -LUT + DC FPGA. Моделирование подтверждает работоспособность элемента и масштабирование для создания элементов на n переменных n -LUT. Анализ показывает существенный выигрыш предложенного подхода: уменьшение сложности в числе транзисторов и снижение временной задержки. Разработанный элемент позволяет существенно увеличить функциональность логики отечественных ПЛИС в рамках существующих ограничений, сдерживающих импортозамещение электронной компонентной базы.

Ключевые слова: логические функции; ПЛИС; LUT; дешифрация набора переменных

DOI: 10.14357/08696527240401

EDN: TCWBAG

1 Введение

Программируемые логические интегральные схемы служат широко используемой элементной базой для проектирования цифровой аппаратуры, в том числе в области перспективных вычислительных архитектур [1–3]. При этом модели конечных автоматов активно используются в системе автоматического проектирования (САПР) ПЛИС [4–6]. В настоящее время некоторые ПЛИС содержат уже десятки миллионов логических элементов, при этом общее число транзисторов в микросхеме на порядок больше [7]. Основные разработчики и производители ПЛИС находятся в США (Интел, Ксайлинкс, Актел, Атмел и др.). Выпускаются также отечественные ПЛИС на заводе в Воронеже [8]. Китайские ПЛИС уже

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Пермский государственный национальный исследовательский университет, tyurinsergfe@yandex.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, fizikoz@gmail.com

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, YStepchenkov@ipiran.ru

⁴Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, diauga@mail.ru

начали активно завоевывать рынок [9, 10]. Активно развивается направление квантовых вычислений с использованием ПЛИС [11–14]. Создаются ПЛИС уже и в 3D-формате [15]. Один из ключевых компонентов ПЛИС — логический элемент, называемый LUT, который реализует заданную в совершенной дизъюнктивной нормальной форме логическую функцию. Логический элемент LUT первых поколений ПЛИС (1980-е гг.) имели три–четыре входа переменных. Сейчас число переменных одного LUT достигло уже семи. Имеются также и LUT на восемь переменных, однако они реализуют не все функции восьми переменных. Следует ожидать дальнейшего роста числа переменных до девяти–десяти. Причем строятся эти элементы (конфигурируются) из LUT на одну, две и три переменные. Такие элементы называют адаптивными логическими модулями (АЛМ). Реализуются также некоторые (не все возможные) функции восьми переменных. Тем не менее в заданной конфигурации (настройке) LUT реализует, т. е. вычисляет, только одну логическую функцию. Это приводит к тому, что, например, при реализации дешифрации набора переменных (в алгоритмах кодирования и декодирования) требуются 2^n LUT, а при увеличении числа переменных получаются весьма нерациональные решения. Примеров модификации АЛМ для эффективной дешифрации набора переменных в отечественных и зарубежных источниках найдено не было.

Стремление к вычислению систем функций от одних и тех же переменных в одном и том же LUT привело к разработке так называемого DC LUT [16–18]. Такой элемент эффективен для реализации систем большого числа функций от одних и тех же n переменных по сравнению с соответствующим количеством LUT на одну функцию, однако обладает высокой сложностью. Попытка реализации дешифрации переменных и вычисления одной функции привела к созданию адаптивного устройства нового типа [19]. Такой элемент способен работать в двух режимах — вычисления функции и дешифрации переменных, но он не реализует одновременное вычисление и того и другого, что снижает эффективность его использования в АЛМ. Поэтому возникла идея объединения этих двух процессов в одном устройстве: одновременно вычислять функцию и проводить дешифрацию набора переменных в LUT. Решению этой задачи и посвящена статья.

2 Метод реализации дешифрации набора переменных одновременно с вычислением логической функции

Рассмотрим реализацию LUT в виде одноуровневого дерева так называемых передающих (pass) транзисторов [16–18] — упрощенное выражение для $n = 2$:

$$z(d_0d_1d_2d_3x_2x_1) = \left. \begin{array}{l} \frac{d_3x_2x_1}{d_2x_2\bar{x}_1} \\ \frac{d_1\bar{x}_2x_1}{d_0\bar{x}_2\bar{x}_1} \end{array} \right\} (\vee \bullet). \quad (1)$$

В выражении (1) d_i — это настройка. Значения функции в определенном столбце таблицы истинности фиксируются и сохраняются в конфигурационную память.

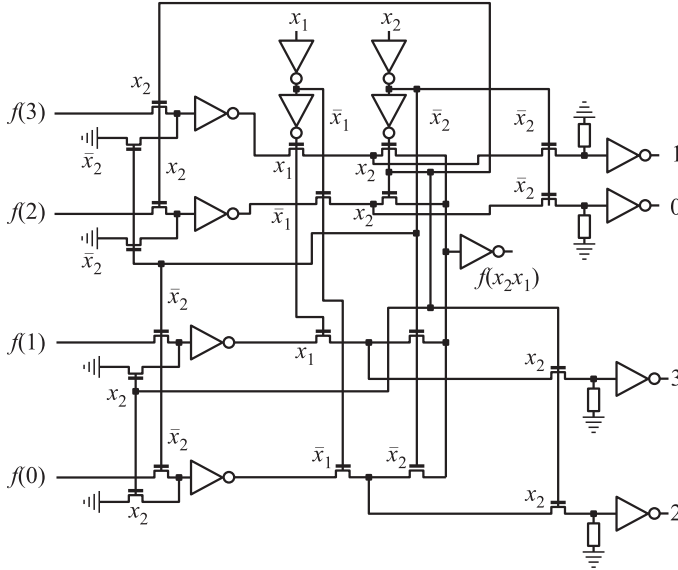


Рис. 1 Логический элемент 2-LUT, вычисляющий значение заданной логической функции и дешифрацию набора переменных одновременно

В соответствии с заданными переменными активируется одна из цепочек, объединяемых операцией монтажного ИЛИ (wired OR), обозначенной символом ($\vee \bullet$).

Ключевой аспект первого варианта элемента по сравнению с двухрежимным элементом [19] состоит в использовании неактивной половины дерева по старшей переменной, которая используется для дешифрации набора. Во время работы устройства одна его часть вычисляет значение заданной логической функции, а другая дешифрирует набор переменных благодаря тому, что в устройстве имеются дополнительные копии переменных. Так, на рис. 1 видно, что в верхней части дерева находится переменная x_2 без инверсии, а в нижней — с инверсией.

Реализацию метода для $n = 2$ по старшей переменной x_2 показывает следующее выражение:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{d_3 x_2}{(\text{Ground}) \bar{x}_2} (\vee \bullet) x_1 \frac{x_2 \Rightarrow z(d_3 x_2 x_1) (\vee \bullet)}{\bar{x}_2 \Rightarrow "1" = z_1(\bar{x}_2 x_1)} \\ & \frac{d_2 x_2}{(\text{Ground}) \bar{x}_2} (\vee \bullet) \bar{x}_1 (\vee \bullet) \frac{x_2 \Rightarrow z(d_2 x_2 \bar{x}_1) (\vee \bullet)}{\bar{x}_2 \Rightarrow "0" = z_0(\bar{x}_2 \bar{x}_1)} \\ & \frac{d_1 \bar{x}_2}{(\text{Ground}) x_2} (\vee \bullet) x_1 (\vee \bullet) \frac{x_2 \Rightarrow z(d_1 \bar{x}_2 x_1) (\vee \bullet)}{\bar{x}_2 \Rightarrow "3" = z_3(x_2 x_1)} \\ & \frac{d_0 \bar{x}_2}{(\text{Ground}) x_2} (\vee \bullet) \bar{x}_1 (\vee \bullet) \frac{x_2 \Rightarrow z(d_0 \bar{x}_2 \bar{x}_1) (\vee \bullet)}{\bar{x}_2 \Rightarrow "2" = z_1(x_2 \bar{x}_1)} \end{aligned} \right\} (\vee \bullet) = z(d_3 d_2 d_1 d_0 x_2 x_1). \quad (2)$$

Ground в (2) означает сигнал логического нуля (константу нуля) с шины «Ноль вольт», который используется для дешифрации (активные нули).

С учетом инверторов (NOT) на выходе и входах настройки и на выходе функций дешифрации, а также необходимости «подтягивания» входов инверторов к уровню логического нуля резисторами R_0 для реализации функций дешифратора в случае неактивности соответствующей цепочки, получим следующее выражение:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{d_3(\text{NOT})x_2}{(V_{cc})\bar{x}_2}(\vee\bullet)x_1 \frac{x_2 \Rightarrow z(d_3x_2x_1)(\vee\bullet)}{\bar{x}_2(R_0)(\text{NOT}) \Rightarrow "1" = z_1(\bar{x}_2x_1)} \\ & \frac{d_2(\text{NOT})x_2}{(V_{cc})\bar{x}_2}(\vee\bullet)\bar{x}_1(\vee\bullet) \frac{x_2 \Rightarrow z(d_2x_2\bar{x}_1)(\vee\bullet)}{\bar{x}_2(R_0)(\text{NOT}) \Rightarrow "0" = z_0(\bar{x}_2\bar{x}_1)} \\ & \frac{d_1(\text{NOT})\bar{x}_2}{(V_{cc})x_2}(\vee\bullet)x_1(\vee\bullet) \frac{\bar{x}_2 \Rightarrow z(d_1\bar{x}_2x_1)(\vee\bullet)}{x_2(R_0)(\text{NOT}) \Rightarrow "3" = z_3(x_2x_1)} \\ & \frac{d_0(\text{NOT})\bar{x}_2}{(V_{cc})x_2}(\vee\bullet)\bar{x}_1(\vee\bullet) \frac{\bar{x}_2 \Rightarrow z(d_0\bar{x}_2\bar{x}_1)(\vee\bullet)}{x_2(R_0)(\text{NOT}) \Rightarrow "2" = z_1(x_2\bar{x}_1)} \end{aligned} \right\} (\vee\bullet)(\text{NOT}) =$$

$$= z(d_3d_2d_1d_0x_2x_1). \quad (3)$$

Однако вместо использования подтягивающих резисторов эффективней было бы введение дополнительных блоков переменных, обеспечивающих подключение уровня нуля к инвертору выхода дешифрации в отсутствие активации соответствующей цепочки. Попробуем реализовать это для $n = 1$:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{(V_{cc})\bar{x}}{(\text{Ground})x}(\vee\bullet)(\text{NOT}) = z_0(x); \\ & \frac{(V_{cc})x}{(\text{Ground})\bar{x}}(\vee\bullet)(\text{NOT}) = z_1(x); \\ & \frac{d_1(\text{NOT})x}{d_0(\text{NOT})\bar{x}} \end{aligned} \right\} (\vee\bullet)(\text{NOT}) = z(d_0d_1x). \quad (4)$$

В выражении (4) имеются несколько составляющих. Первая часть, вычисляющая значение логической функции одной переменной

$$\frac{d_1(\text{NOT})x}{d_0(\text{NOT})\bar{x}} \left\} (\vee\bullet)(\text{NOT}) = z(d_0d_1x),$$

может быть использована как «строительный блок», называемый мультиплексором 2 : 1, при увеличении разрядности в следующем виде:

$$\frac{x}{\bar{x}} \left\} (\vee\bullet).$$

В двух других независимых частях выражения (4) одновременно выполняется дешифрация переменной с обеспечением ортогональности сигнала на входе инверторов (это значит, что всегда будет либо низкий уровень, либо высокий, разрыв в цепи невозможен):

$$\frac{(V_{cc})\bar{x}}{(\text{Ground})x} (\vee\bullet)(\text{NOT}) = z_0(x);$$

$$\frac{(V_{cc})x}{(\text{Ground})\bar{x}} (\vee\bullet)(\text{NOT}) = z_1(x).$$

Если, например, $x = 0$, то активизируется путь

$$(V_{cc})\bar{x}(\vee\bullet)(\text{NOT}) = z_0(x) = 0.$$

Происходит инверсия константы «1» (V_{cc}), уровня шины питания. В то же время по другой ветви:

$$(\text{Ground})\bar{x}(\vee\bullet)(\text{NOT}) = z_1(x) = 1.$$

Происходит инверсия константы «0», т. е. шины «Ноль вольт» (Ground). Аналогично выполняется дешифрация при $x = 1$. С помощью (4) можно строить элементы для произвольного числа переменных с учетом ограничений [20] по числу последовательно соединенных передающих транзисторов (в ПЛИС — не более трех).

3 Разработка электрических схем и их моделирование

Предлагаемая схема 2-LUT по выражению (3) представлена на рис. 1, где показаны инверторы для восстановления логических уровней сигналов, проходящих через множество коммутаторов в матрицах коммутации ПЛИС. Они не учитываются в выражениях. Видно, что при $x_2 = 1$ дешифрируются «младшие» наборы 1, 0; а при $x_2 = 0$, наоборот, «старшие» наборы 3, 2. Рисунок 2 показывает схему элемента на одну переменную, построенную по выражению (4), а на рис. 3 представлена его модель в системе моделирования Multisim [21].

При построении элемента на две переменные из трех элементов на одну переменную (рис. 4) константы подключены только к «старшему» («правому») элементу на одну переменную, остальные получают константы от него.

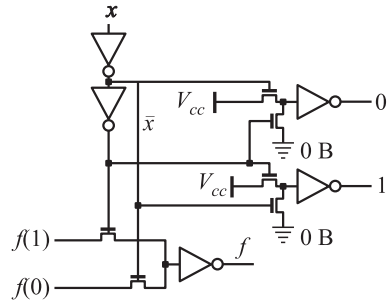


Рис. 2 Модуль 1-LUT + DC с обеспечением ортогональности сигналов по входам инверторов дешифрации

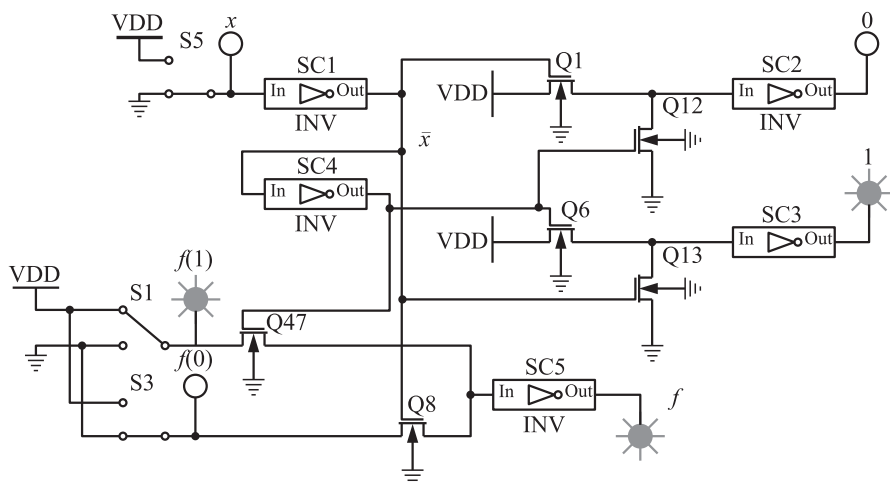


Рис. 3 Модель предлагаемого 1-LUT + DC с обеспечением ортогональности сигналов по входам инверторов дешифрации при задании функции отрицания: переменная = 0, выход 0 активен

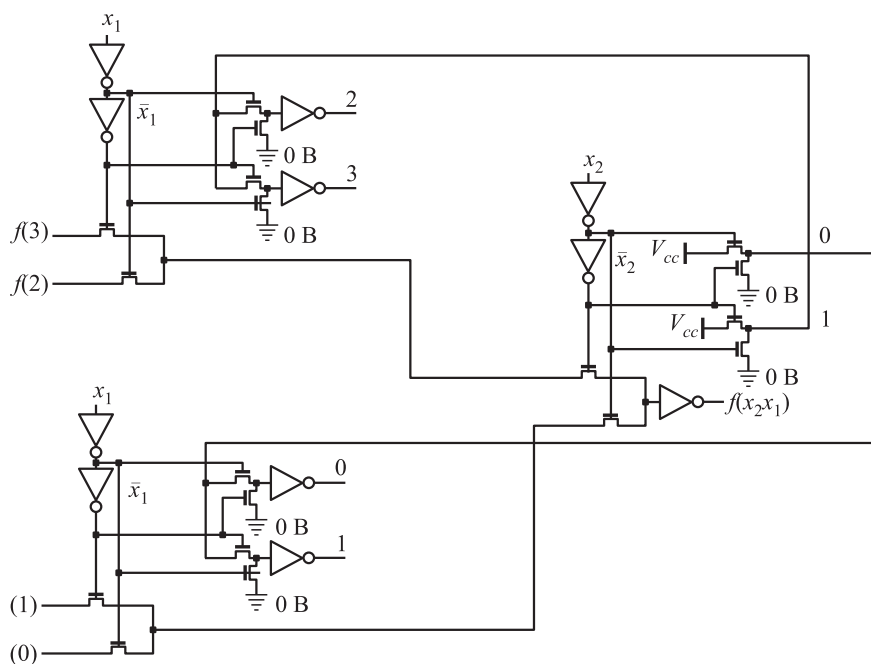


Рис. 4 Модуль 2-LUT+DC, построенный из предлагаемых 1-LUT + DC

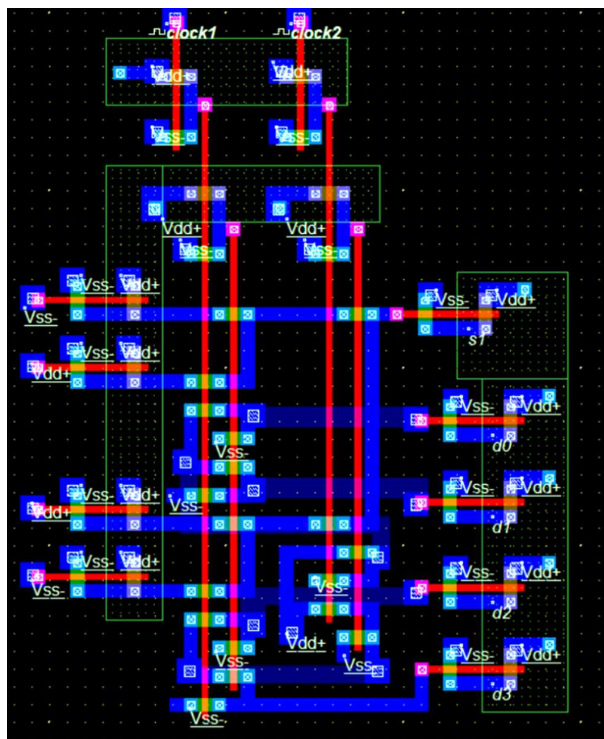


Рис. 5 Топология предлагаемого элемента 2-LUT + DC

Следует отметить, что по входу первой переменной достаточно только пары инверторов. На рис. 4 реализовано многоуровневое дерево в отличие от рис. 1. Моделирование в САПР Microwind [22] подтвердило корректность вычисления заданной функции и дешифрации входных наборов по предложенному методу.

На рис. 5 представлена разработанная топология для элемента, оперирующего двумя переменными.

4 Оценка эффективности предлагаемого метода

В элементе на одну переменную (1-LUT) всего 8 транзисторов. Если учитывать инверторы по входам настройки, то 12. Дешифрация требует еще 8 транзисторов. Итого 20 против 12, т. е. сложность возрастает по отношению к исходному LUT.

Но увеличения задержки вычисления основной функции на рис. 3 нет в отличие от схемы на рис. 1, в которой вводятся дополнительные транзисторы в цепь от конфигурационного бита до выхода. Однако для реализации и функции, и де-

шифрации на основе известного LUT необходимы три 1-LUT, или $8 + 8 + 8 = 24$ транзистора против 20. Для построения элемента на две переменные (2-LUT) необходимо три таких элемента (см. рис. 4), в одном из которых инверторы на выходах дешифрации исключены, а в двух других исключены инверторы на выходах функции. При этом сложность известного 2-LUT составляет 24 транзистора (с инверторами по входам настройки). Получаем $24 \times 5 = 120$ транзисторов для реализации функции двух переменных и дешифратора на четыре выхода.

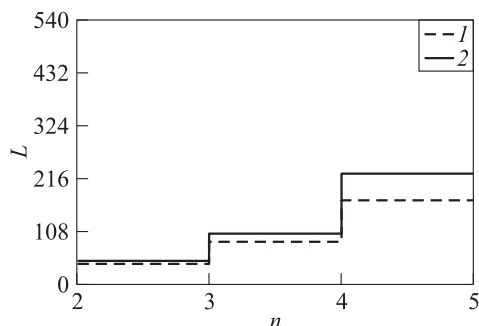


Рис. 6 Выигрыш в числе транзисторов решения L_1 (1) по сравнению с известным L_0 (2)

ным L_0 [19] в зависимости от числа переменных. Очевидно, что выигрыш экспоненциально увеличивается с ростом числа переменных n .

5 Заключение

Решена задача разработки нового подхода к реализации адаптивного элемента, который, в отличие от известного, вычисляет логическую функцию одновременно с дешифрацией переменной. Это позволяет повысить функциональные возможности ПЛИС. Моделирование подтвердило работоспособность устройств, разработанных в соответствии с новым предложенным методом. Для одной переменной получен 12%-ный выигрыш по сложности в числе транзисторов по сравнению с известным решением без увеличения задержки. Для двух переменных выигрыш составил 150%, а для трех — более 200%. При этом нет увеличения числа транзисторов на пути сигнала от входов к выходу при вычислении основной функции.

Использование разработанного элемента для реализации систем функций от одних и тех же переменных в ПЛИС позволяет получить качественно новые решения при реализации конечных автоматов. В дальнейшем авторы планируют использовать разработанные элементы для создания самосинхронных решений [23].

В то же время предлагаемый элемент содержит всего 48 транзисторов (см. рис. 5), выигрыш существенный, даже с учетом повторения пар инверторов на входах младшей переменной.

Элемент 3-LUT + DC требует $72 + 16 = 88$ транзисторов с учетом повторения пар инверторов на входах младшей переменной, а известный 3-LUT — $14 + 8 + 2 + 6 = 30$ транзисторов, но таких элементов нужно уже 9, т.е. всего 270 транзисторов против 88.

На рис. 6 показан выигрыш в числе транзисторов предлагаемого решения L_1 по сравнению с известным L_0 .

Литература

1. *Степченков Ю. А., Морозов Н. В., Дьяченко Ю. Г., Хилько Д. В., Степченков Д. Ю.* Развитие гибридной многоядерной рекуррентной архитектуры на ПЛИС // Системы и средства информатики, 2020. Т. 30. № 4. С. 95–101. doi: 10.14357/08696527200409. EDN: ALLSBO.
2. *Степченков Ю. А., Морозов Н. В., Дьяченко Ю. Г., Хилько Д. В.* Аппаратная реализация рекуррентного обработчика сигналов // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 3. С. 113–122. doi: 10.14357/08696527210310. EDN: ТМYYXC.
3. *Степченков Ю. А., Морозов Н. В., Дьяченко Ю. Г., Хилько Д. В., Степченков Д. Ю., Шкунов Ю. И.* Аппаратная реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов в рекуррентном потоковом процессоре на ПЛИС // Известия вузов. Электроника, 2022. Т. 27. № 3. С. 356–366. doi: 10.24151/1561-5405-2022-27-3-356-366. EDN: NAIFLI.
4. *Пирогов А. А., Пирогова Ю. А., Башкиров А. В., Чепелев М. Ю., Жилин Б. И.* Методика проектирования преобразователя кода Грея на ПЛИС // Вестник Воронежского института ФСИН России, 2020. № 3. С. 9–14. EDN: QHAANU.
5. *Berezin N. M., Chernetskaya I. E., Panishchev V. S., Shabarov A. M.* Development of a device for multiplying numbers by means of FPGA // J. Phys. Conf. Ser., 2021. Vol. 2142. Art. 012001. 7 p. doi: 10.1088/1742-6596/2142/1/012001.
6. *Строгонов А.* Проектирование конечных автоматов в приложении STATEFLOW системы MATLAB/SIMULINK с последующей реализацией в базе ПЛИС // Электроника: наука, технология, бизнес, 2023. № 3(224). С. 134–147. doi: 10.22184/1992-4178.2023.224.3.134.146. EDN: BDJLBU.
7. *Строгонов А., Кривчун М., Городков П.* Обзор программных средств с открытым исходным кодом для исследования современных архитектур ПЛИС XILINX // Электроника: наука, технология, бизнес, 2020. № 1(192). С. 100–107. doi: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.100.107. EDN: UPNZSW.
8. *Арбузов И., Строгонов А., Городков П.* Пример разработки проекта в базе ПЛИС 5578TC024 // Компоненты и технологии, 2019. № 7(216). С. 66–69. EDN: GGJBLH.
9. *Строгонов А., Городков П.* ПЛИС компании Guangdong Gowin Semiconductor Corporation // Компоненты и технологии, 2020. № 1(222). С. 84–86. EDN: BIUCZX.
10. *Строгонов А., Городков П.* Обзор ПЛИС китайских производителей // Электроника: наука, технология, бизнес, 2022. № 4(215). С. 66–75. doi: 10.22184/1992-4178.2022.215.4.66.74. EDN: ZFMFUX.
11. *Levental M.* Tensor networks for simulating quantum circuits on FPGAs. — Cornell University, 2021. arXiv:2108.06831v1 [quant-ph]. 16 p.
12. *Li H., Tang Y., Que Zh., Zhang J.* FPGA accelerated post-quantum cryptography // IEEE T. Nanotechnol., 2022 Vol. 21. P. 685–691. doi: 10.1109/TNANO.2022.3217802.
13. *Giorgio A.* Project and implementation of a quantum logic gate emulator on FPGA using a model-based design approach // IEEE Access, 2024. Vol. 12. P. 41317–41353. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3377458.
14. *Ktari J., Frikha T., Hamdi M., Affes N., Hamam H.* Enhancing blockchain security and efficiency through FPGA-based consensus mechanisms and post-quantum

- cryptography // Recent Advances Electrical Electronic Engineering, 2024 (in press). doi: 10.2174/0123520965288815240424054237.
15. *Rahimi H.* Optimum implementation of digital logic circuits on 3D FPGAs: Master Thesis. — Sanandaj, Iran: University of Kurdistan, 2023. doi: 10.13140/RG.2.2.24347.85283.
 16. *Vikhorev R.* Universal logic cells to implement systems functions // NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference Proceedings. — IEEE, 2016. P. 373–375. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448197.
 17. *Vikhorev R.* Improved FPGA logic elements and their simulation // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Proceedings. — IEEE, 2018. P. 259–264. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317080.
 18. *Tyurin S. F., Vikhorev R. V.* A decoder — look up tables for FPGAs // IJC, 2021. Vol. 20. No. 3. P. 365–373. doi: 10.47839/ijc.20.3.2282.
 19. *Vasenin I. A., Sovetov S. I., Oputin N. E., Tyurin S. F.* Advanced logic gates for FPGAs // 24th Conference (International) of Young Professionals in Electron Devices and Materials Proceedings. — IEEE, 2023. P. 110–115. doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225215.
 20. *Mead C. A., Conway L.* Introduction to VLSI systems. — Addison-Wesley, 1980. 426 p.
 21. *Шегал А. А.* Применение программного комплекса Multisim для проектирования устройств на микроконтроллерах: Лабораторный практикум. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 114 с.
 22. *Etienne S.* Microwind & Dsch Version 3.5: User's Manual Lite Version. — Toulouse, 2009. 130 p.
 23. *Степченко Ю. А., Каменских А. Н., Тюрин С. Ф., Рождественский Ю. В.* Модели отказоустойчивых самосинхронных схем // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 19–30. doi: 10.14357/08696527160402. EDN: XAKZAL.

Поступила в редакцию 05.06.24

A NEW APPROACH TO IMPLEMENTING LOGICAL FUNCTIONS IN FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAYS

S. F. Tyurin^{1,2}, S. I. Sovetov¹, Yu. A. Stepchenkov³, and Yu. G. Diachenko³

¹Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Prosp., Perm 614990, Russian Federation

²Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614068, Russian Federation

³Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The expansion of the functionality of the LUT (Look up Table) logic element of field-programmable gate array (FPGA) is considered. The proposed method uses the inactive half of the element's transistor tree. The article

studies a single-variable element 1-LUT implementation, which performs a logic function simultaneously with the variable decoding (DC), and its use to create an “ n -LUT + DC FPGA.” The simulation validates the item’s performance and scaling to create n -LUT item. The analysis shows a significant gain of the proposed approach: reduced complexity in the number of transistors and reduced time delay. The developed element makes it possible to significantly increase the functionality of the logic of domestic FPGAs within the framework of existing restrictions that limit import substitution of the electronic component base.

Keywords: logic function; FPGA; LUT; variable set decoding

DOI: 10.14357/08696527240401

EDN: TCWBAG

References

1. Stepchenkov, Yu. A., N. V. Morozov, Yu. G. Diachenko, D. V. Khilko, and D. Yu. Stepchenkov. 2020. Razvitie gibridnoy mnogoyadernoy rekurrentnoy arkhitektury na PLIS [Multicore hybrid recurrent architecture expansion on FPGA]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 30(4):95–101. doi: 10.14357/08696527200409. EDN: ALLSBO.
2. Stepchenkov, Yu. A., N. V. Morozov, Yu. G. Diachenko, and D. V. Khilko. 2021. Apparatnaya realizatsiya rekurrentnogo obrabotchika signalov [Recurrent signal processor hardware implementation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(3):113–122. doi: 10.14357/08696527210310. EDN: TMYXXC.
3. Stepchenkov, Yu. A., N. V. Morozov, Yu. G. Diachenko, D. V. Khilko, D. Yu. Stepchenkov, and Yu. I. Shikunov. 2022. Apparatnaya realizatsiya algoritmov tsifrovoy obrabotki signalov v rekurrentnom potokovom protsessore na PLIS [Hardware implementation of the digital signal processing algorithms in recurrent signal processor on FPGA]. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics] 27(3):356–366. doi: 10.24151/1561-5405-2022-27-3-356-366. EDN: NAIFLI.
4. Pirogov, A. A., Yu. A. Pirogova, A. V. Bashkirov, M. Yu. Chepelev, and B. I. Zhilin. 2020. Metodika proektirovaniya preobrazovatelya koda Greya na PLIS [Design procedure of the Gray code converter on FPGA]. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii* [Proceedings of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service] 3:9–14. EDN: QHAANU.
5. Berezin, N. M., I. E. Chernetskaya, V. S. Panishchev, and A. M. Shabarov. 2021. Development of a device for multiplying numbers by means of FPGA. *J. Phys. Conf. Ser.* 2142:012001. 7 p. doi: 10.1088/1742-6596/2142/1/012001.
6. Strogonov, A. 2023. Proektirovanie konechnykh avtomatov v prilozhenii STATEFLOW sistemy MATLAB/SIMULINK s posleduyushchey realizatsiey v baze PLIS [Designing finite-state machine in MATLAB / SIMULINK system’s stateflow tool with subsequent implementation at the FPGA basis]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, and Business] 3(224):134–147. doi: 10.22184/1992-4178.2023.224.3.134.146. EDN: BDJLBU.
7. Strogonov, A., M. Krivchun, and P. Gorodkov. 2020. Obzor programmnykh sredstv s otkrytym iskhodnym kodom dlya issledovaniya sovremennykh arkhitektur PLIS XILINX [Overview of open source software tools for researching modern

- XILINX FPGA architectures]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, and Business] 1(192):100–107. doi: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.100.107. EDN: UPNZSW.
8. Arbuzov, I., A. Strogonov, and P. Gorodkov. 2019. Primer razrabotki proekta v bazise PLIS 5578TC024 [An example of project development based on FPGA 5578TS024]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies] 7(216):66–69. EDN: GGJBLH.
 9. Strogonov, A., and P. Gorodkov. 2020. PLIS kompanii Guangdong Gowin Semiconductor Corporation [FPGA from Guangdong Gowin Semiconductor Corporation]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies] 1(222):84–86. EDN: BIUCZX.
 10. Strogonov, A., and P. Gorodkov. 2022. Obzor PLIS kitayskikh proizvoditeley [Overview of FPGAs from Chinese manufacturers]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, and Business] 4(215):66–75. doi: 10.22184/1992-4178.2022.215.4.66.74. EDN: ZFMFUX.
 11. Levental, M. 2021. Tensor networks for simulating quantum circuits on FPGAs. arXiv.org. 16 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2108.06831v1.pdf> (accessed October 4, 2024).
 12. Li, H., Y. Tang, Zh. Que, and J. Zhang. 2022. FPGA accelerated post-quantum cryptography. *IEEE T. Nanotechnol.* 21:685–691. doi: 10.1109/TNANO.2022.3217802.
 13. Giorgio, A. 2024. Project and implementation of a quantum logic gate emulator on FPGA using a model-based design approach. *IEEE Access* 12:41317–41353. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3377458.
 14. Ktari, J., T. Frikha, M. Hamdi, N. Affes, and H. Hamam. 2024 (in press). Enhancing blockchain security and efficiency through FPGA-based consensus mechanisms and post-quantum cryptography. *Recent Advances Electrical Electronic Engineering*. doi: 10.2174/0123520965288815240424054237.
 15. Rahimi, H. 2023. Optimum implementation of digital logic circuits on 3D FPGAs. Sanandaj, Iran: University of Kurdistan. Master Thesis. doi: 10.13140/RG.2.2.24347.85283.
 16. Vikhorev, R. 2016. Universal logic cells to implement systems functions. *NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference Proceedings*. IEEE. 373–375. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448197.
 17. Vikhorev, R. 2018. Improved FPGA logic elements and their simulation. *Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Proceedings*. IEEE. 259–264. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317080.
 18. Tyurin, S. F., and R. V. Vikhorev. 2021. A decoder — look up tables for FPGAs. *IJC* 20(3):365–373. doi: 10.47839/ijc.20.3.2282.
 19. Vasenin, I. A., S. I. Sovetov, N. E. Oputin, and S. F. Tyurin. 2023. Advanced logic gates for FPGAs. *24th Conference (International) of Young Professionals in Electron Devices and Materials Proceedings*. IEEE. 110–115. doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225215.
 20. Mead, C. A., and L. Conway. 1980. *Introduction to VLSI systems*. Addison-Wesley. 426 p.
 21. Shegal, A. A. 2014. *Primenenie programmogo kompleksa Multisim dlya proektirovaniya ustroystv na mikrokontrollerakh: Laboratornyy praktikum* [Application of the Multisim software package for designing devices on microcontrollers: Laboratory practical training]. Ekaterinburg: Ural University Press. 114 p.

22. Etienne, S. 2009. *Microwind & Dsch version 3.5: User's manual lite version*. Toulouse. 130 p.
23. Stepchenkov, Yu. A., A. N. Kamenskih, S. F. Tyurin, and Yu. V. Rogdestvenski. 2016. Modeli otkazoustoychivyykh samosinkhronnykh skhem [Models of fault-tolerant self-timed circuits]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):19–30. doi: 10.14357/08696527160402. EDN: XAKZAL.

Received June 5, 2024

Contributors

Tyurin Sergey F. (b. 1953) — Doctor of Science in technology, professor, Honored inventor of RF, professor, Department of Automation and Telemechanic, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Prosp., Perm 614990, Russian Federation; professor, Department of Software Computing Systems, Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614068, Russian Federation; tyurinsergfeo@yandex.ru

Sovetov Stanislav I. (b. 1990) — PhD student, Department of Automation and Telemechanic, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Prosp., Perm 614990, Russian Federation; fizikoz@gmail.com

Stepchenkov Yuri A. (b. 1951) — Candidate of Science (PhD) in technology, head of department, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; YStepchenkov@ipiran.ru

Diachenko Yuri G. (b. 1958) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; diaura@mail.ru

ДИСКРЕТНОЕ УСЛОВНО-ОПТИМАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ В НЕЯВНЫХ НАБЛЮДАЕМЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*И. Н. Синицын*¹

Аннотация: Статья посвящена методам условно-оптимального (по Пугачёву) синтеза фильтров для оценивания (фильтрации, экстраполяции и интерполяции) в неявных дискретных стохастических системах (СтС), приводимых к явным путем эквивалентной гауссовской и негауссовской линеаризации. Предполагается, что наблюдения не влияют на объект наблюдения и описываются дискретными нелинейными уравнениями с некоррелированными и автокоррелированными помехами. Дан обзор работ в области синтеза условно-оптимальных фильтров и экстраполяторов (УОФ и УОЭ) для явных и неявных дискретных наблюдаемых СтС. Приведены основные модели дискретных неявных СтС и методы их эквивалентной линеаризации. Получены уравнения УОФ и УОЭ. Основное внимание уделено трем методам условно-оптимальной интерполяции: прямого действия, с фиксированной задержкой и с фиксированным интервалом. В качестве примера рассмотрены УОФ и УОЭ для авторегрессионных приведенных уравнений. Сделаны основные выводы, обсуждены примеры и направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: авторегрессионные уравнения; дискретные фильтры; наблюдаемая СтС; стохастическая система (СтС); условно-оптимальная интерполяция; условно-оптимальная фильтрация (УОФ); условно-оптимальная экстраполяция (УОЭ)

DOI: 10.14357/08696527240402

EDN: TLHYYA

1 Введение

Для решения задач оценивания (фильтрации, экстраполяции и интерполяции) в реальном масштабе времени применяется принцип дискретного условно-оптимального оценивания Пугачёва [1]. Этот принцип состоит в отказе от абсолютной оптимальности и ограничении оптимальными оценками для некоторых классов допустимых оценок, удовлетворяющих некоторым простым в реализации разностным уравнениям, которые могут быть вычислены на основе результатов наблюдений в масштабе реального времени. Главная трудность при синтезе дискретных УОФ состоит в выборе класса допустимых дискретных фильтров. Обычно в практических задачах классом допустимых дискретных УОФ считают множество фильтров, описываемых конечномерными разностными уравнениями с некоторыми неизвестными структурными коэффициентами. В этом случае проблема оптимизации сводится к определению оптимальных значений всех неизвестных коэффициентов, которые в общем случае зависят от времени.

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, sinitsin@dol.ru

Первая особенность дискретного нелинейного условно-оптимального оценивания заключается в том, что такое оценивание является многокритериальным. Таким образом, надлежит воспользоваться известными парето-оптимальными оценками для выбора класса допустимых фильтров. Вторая особенность дискретного нелинейного условно-оптимального оценивания заключается в том, что оптимальные коэффициенты дискретных фильтров должны определяться в ходе проектирования фильтра только априорными данными без использования текущих наблюдений, как это имеет место в фильтрах Калмана. Данные текущих наблюдений используются лишь в процессе дискретной фильтрации при рекуррентном решении уравнений фильтра.

Поставим задачу найти условно-оптимальную оценку $\hat{X}_k$ для любого момента времени k случайных величин (СВ) $\hat{X}_k$, используя наблюдения $Y_1^l = \{Y_1, \dots, Y_k\}$ в классе допустимых фильтров.

В случае явных дискретных нелинейных регрессионных негауссовских СтС вида

$$X_{k+1} = \omega_k(X_k, Y_k, V_k), \quad Y_k = \omega_{1k}(X_k, Y_k, V_k) \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

класс допустимых УОФ прямой фильтрации определяется следующим уравнением Пугачёва:

$$\hat{X}_{k+1} = \delta_k \zeta_k(Y_k, \hat{X}_k) + \gamma_k. \quad (2)$$

Здесь ζ_k – некоторые известные структурные функции УОФ; δ_k и γ_k – структурные коэффициенты. Каждому выбору значений δ_k и γ_k соответствует определенный допустимый фильтр, а все возможные значения δ_k и γ_k определяют класс допустимых фильтров для данных функций ζ_k . Различные последовательности функций $\{\zeta_k\}$ определяют различные классы допустимых фильтров. Каждому выбору $\{\zeta_k\}$ соответствует определенный класс допустимых фильтров.

Последовательность структурных функций $\{\zeta_k\}$ в (2) может быть в принципе произвольной. Но точность фильтрации зависит от выбора $\{\zeta_k\}$. Таким образом, встает вопрос о рациональном выборе $\{\zeta_k\}$. Априори можно только сказать, что чем больше размерность структурных векторных функций ζ_k , тем выше точность фильтрации.

Следуя Пугачёву, примем за условно-оптимальный такой допустимый фильтр, который минимизирует найденный в результате предыдущих шагов средний квадрат ошибки $M|\hat{X}_{k+1} - X_{k+1}|^2$ на каждом шаге (при каждом k) путем выбора δ_k и γ_k при данных значениях δ_h и γ_h , $h \leq k$. Такой фильтр называется дискретным фильтром Пугачёва. Значения δ_k и γ_k , соответствующие УОФ, принимаются за оптимальные значения δ_k и γ_k .

Уравнение (2) показывает, каким образом при определении допустимого фильтра используется в каждый момент времени $k + 1$ информация предыдущих результатов наблюдений $Y_1, \dots, Y_k$, а именно: эта информация реализуется

через $\hat{X}_k$. И только текущий результат наблюдения Y_k используется непосредственно при формировании оценки $\hat{X}_{k+1}$ в момент времени k . Таково условие, при котором $M|\hat{X}_{k+1} - X_{k+1}|^2$ минимизируется в каждый момент времени $k + 1$ УОФ. Таким образом, задача синтеза УОФ Пугачёва сводится к нахождению оптимальных последовательностей $\{\delta_k\}$ и $\{\gamma_k\}$ в (2).

Задача экстраполяции отличается от задачи оценивания только величиной, которая должна быть оценена. В задаче экстраполяции вместо X_{k+1} будет оцениваться будущее значение $X_{k+\tau+1}$ дискретного процесса X_k в момент времени $k + 1$ по результатам наблюдения $Y_0, Y_1, \dots, Y_k$, где τ — некоторое натуральное число. Рассмотрим следующую негауссовскую нелинейную регрессионную СтС:

$$X_{k+1} = \omega_k(X_k, V_k), \quad Y_k = \omega_{1k}(X_k, Y_k, V_k) \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Для того чтобы $\hat{X}_{k+1}$ была оптимальной оценкой $X_{k+\tau+1}$, минимизирующей средний квадрат ошибки $M|\hat{X}_{k+1} - X_{k+\tau+1}|^2$, правая часть уравнения УОЭ

$$\hat{X}_{k+\tau+1} = \delta_k \zeta_k(X_k, \hat{X}_k) + \gamma_k$$

должна быть линейной среднеквадратичной регрессией СВ $X_{k+\tau+1}$ на случайный вектор $\zeta_k(Y_k, \hat{X}_k)$.

Следуя [1, 2], рассмотрим три постановки задачи дискретной интерполяции.

1. Интерполяция с фиксированной точкой (прямая интерполяция) — момент времени оценивания фиксирован, т. е. $k = S$, а интервал наблюдения $l = k \geq S$ растёт.
2. Интерполяция с фиксированной задержкой — ни k , ни l не фиксируются, но их разность остается постоянной, т. е. $l - k = \tau$ (τ — постоянное время задержки).
3. Интерполяция с фиксированным интервалом (обратная интерполяция) — интервал наблюдения фиксирован: $l = N$ (N — постоянная величина), а время оценивания k изменяется от 0 до N .

Эффективные решения задач интерполяции случайных стохастических процессов (СтП), описываемых разностными уравнениями, известны для линейных уравнений и специального класса нелинейных уравнений (условно-гауссовские последовательности). В общем случае для нелинейных уравнений (1) эффективного решения поставленных задач интерполяции не найдено. В случае когда возможен выбор структуры интерполятора на базе априорной информации о наблюдаемом СтП, эффективное решение задач дискретной интерполяции может быть получено на основе принципа дискретного условно-оптимального оценивания [1, 3, 4].

Вопросы синтеза дискретных УОФ и УОЭ для дискретных явных гауссовских и негауссовских СтС рассмотрены в [1]. Поставим задачу синтеза

дискретных УОФ для фильтрации, экстраполяции и интерполяции на основе эквивалентной линеаризации нелинейных неявных функций относительно старшей дискретной переменной. В разд. 2 рассмотрены два типа неявных дискретных СтС, приводимых к явным путем эквивалентной гауссовской и негауссовской линеаризации. Разделы 3 и 4 посвящены дискретным УОФ и УОЭ. В разд. 5 рассмотрены три вида условно-оптимальных интерполяторов. В разд. 6 рассмотрено применение результатов разд. 3 и 4 для приведенных авторегрессионных уравнений.

2 Приводимые неявные дискретные системы

В качестве моделей дискретных неявных СтС будем рассматривать следующие:

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{k+1}(X_{k+1}, X_k, U_k) &= 0; \quad U_{k+1} = \omega'_k(U_k, V_k); \\ Y_k &= \omega_{1k}(X_k, V_k) \quad (k = 1, 2 \dots); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{k+1}(X_{k+1}, X_k, U_k) &= 0; \quad U_{k+1} = \omega'_k(U_k, W_k, V_k); \\ Y_k &= \omega_{1k}(X_k, W_k, V_k), \quad W_k = \omega'_{1k}(W_k, V_k) \quad (k = 1, 2 \dots), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где Ω_{k+1} , ω'_k , ω_{1k} и ω'_{1k} — известные функции отмеченных переменных; X_k , Y_k и U_k — векторы состояния, наблюдения и случайных возмущений; W_k и V_k — независимые негауссовские СВ с известными распределениями.

Следуя [5, 6], для гауссовских СтС применим к неявным уравнениям состояния среднеквадратичную линейную регрессию относительно X_{k+1} :

$$\begin{aligned} \Omega_{k+1}(X_{k+1}, X_k, U_k) &\approx \\ &\approx \Omega_{0,k+1}(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1}) + \Omega_{1,k+1}(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1}) X_{k+1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\Omega_{0,k+1} = \Omega_{0,k+1}(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1})$ и $\Omega_{1,k+1} = \Omega_{1,k+1}(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1})$ — векторные и матричный коэффициенты регрессионной линеаризации, причем $\det \Omega_{1,k+1} \neq 0$; m_{k+1} и K_{k+1} — векторы математического ожидания и ковариационной матрицы СтП X_{k+1} . В результате неявные уравнения (3) и (4) примут следующий явный вид:

$$\left. \begin{aligned} X_{k+1} &= \omega_k^\Pi(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1}) = \\ &= -\Omega_{1,k+1}^{-1}(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1}) \Omega_{0,k+1}(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1}); \\ U_{k+1} &= \omega'_k(U_k, V_k); \quad Y_k = \omega_{1k}(X_k, V_k) \quad (k = 1, 2 \dots); \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} X_{k+1} &= \omega_k^\Pi(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1}) = \\ &= -\Omega_{1,k+1}^{-1}(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1}) \Omega_{0,k+1}(X_k, U_k, m_{k+1}, K_{k+1}); \\ U_{k+1} &= \omega'_k(U_k, V_k, W_k); \\ Y_k &= \omega_{1k}(X_k, W_k), \quad W_k = \omega'_{1k}(V_k, W_k) \quad (k = 1, 2 \dots). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Уравнения (6) и условие $\det \Omega_{1,k+1} \neq 0$ лежат в основе **теоремы 2.1** для неявной гауссовской СтС (4), а уравнения (7) и условие $\det \Omega_{1,k+1} \neq 0$ — в основе **теоремы 2.2**.

В случае негауссовской СтС, когда используется линейная эквивалентная аппроксимация, формула (5) принимает вид

$$\Omega_{k+1}(X_{k+1}, X_k, U_k) \approx \Omega_{0,k+1}(X_k, U_k, \pi_{k+1}) + \Omega_{1,k+1}(X_k, U_k, \pi_{k+1}) X_{k+1}.$$

Здесь коэффициенты эквивалентной линеаризации $\Omega_{0,k+1}$ и $\Omega_{1,k+1}$ зависят от параметров π_{k+1} , определяющих их одномерные плотности и характеристические функции. В этом случае уравнения (6) и (7) принимают соответственно следующий вид:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= \omega_{k+1}^{\Pi}(X_k, U_k, \pi_{k+1}); \quad U_{k+1} = \omega'_k(U_k, V_k), \\ Y_k &= \omega_{1k}(X_k, U_k) \quad (k = 1, 2, \dots) \end{aligned}$$

(**теорема 2.3**) и **теорема 2.4**:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= \omega_k^{\Pi}(X_k, U_k, \pi_k); \quad U_{k+1} = \omega'_k(U_k, V_k, W_k); \\ Y_k &= \omega_{1k}(X_k, W_k), \quad W_k = \omega'_{1k}(V_k, W_k) \quad (k = 1, 2, \dots). \end{aligned}$$

Замечание 2.1. Случай неявных СтС, зависящих от $X_{k+l}, \dots, X_{k+l+1}$, где первые уравнения систем (3) и (4) имеют вид:

$$\Omega_{k+l}(X_{k+l}, X_{k+l+1}, \dots, X_k, U_{k+l+1}, \dots, U_k) = 0 \quad (l = 1, 2, \dots),$$

приводится к уравнениям (3) и (4), если ввести расширенные векторы состояния

$$\bar{X}_k^l = [X_k^T \dots X_{k+l}^T]^T; \quad \bar{U}_k^l = [U_k^T \dots U_{k+l}^T]^T.$$

3 Дискретная условно-оптимальная фильтрация

Применяя результаты [1] к приведенным явным дискретным СтС (теоремы 2.1–2.4), придем к следующим результатам.

Теорема 3.1. В условиях теоремы 2.1 и существования конечных одномерных вероятностных моментов УОФ определяется уравнениями:

$$\hat{X}_{k+1} = \delta_k \zeta_k(\omega_{1k}(X_k, V_k), \hat{X}_k) + \gamma_k. \quad (8)$$

Здесь

$$\gamma_k = m_{k+1} - \delta_k \rho_k, \quad \delta_k = D_k B_k^{-1},$$

где

$$\begin{aligned} m_{k+1} &= M\omega_k(X_k, V_k); \\ \rho_k &= M\zeta_k(\omega_{1k}(X_k, V_k), \hat{X}_k); \end{aligned}$$

$$D_k = M[\omega_k(X_k, V_k) - m_{k+1}] \zeta_k(\omega_{1k}(X_k, V_k), \hat{X}_k)^T;$$

$$B_k = M\left[\zeta_k(\omega_{1k}(X_k, V_k), \hat{X}_k) - \rho_k\right] \zeta_k(\omega_{1k}(X_k, V_k), \hat{X}_k)^T, \det B_k \neq 0.$$

Совместное распределение X_k и $\hat{X}_k$ и распределение V_k (которое по предположению известно) определяется следующими характеристическими функциями:

$$g_{1,k+1}(\lambda, \mu) = M \exp \left\{ i\lambda^T \omega_k(X_k, V_k) + i\mu^T [\delta_k \zeta_k(\omega_{1k}(X_k, V_k), \hat{X}_k) + \gamma_k] \right\};$$

$$g_{1,1}(\lambda, \mu) = M \exp \left\{ i\lambda^T X_1 + i\mu^T \hat{X}_1 \right\}.$$

Замечание 3.1. Чтобы начать рекуррентный процесс, необходимо задать совместное распределение X_1 и U_1 (начальное распределение). Если распределение величины X_1 (независимой от V_1) известно и определяется характеристической функцией $k_1(\lambda)$, можно принять за оценку $\hat{X}_1$ математическое ожидание $\hat{X}_1 = M X_1 = m_1$ и определить совместную характеристическую функцию X_1 и $\hat{X}_1$ по формуле

$$g_{1,1}(\lambda, \mu) = k_1(\lambda) e^{i\mu^T m_1}.$$

Можно также определить оценку $\hat{X}_1$ как СВ с выбранным произвольно распределением и принять

$$g_{1,1}(\lambda, \mu) = h_1(\lambda) k_1(\mu),$$

где $k_1(\mu)$ — характеристическая функция СВ $\hat{X}_1$. В том случае когда распределение неизвестно, его приходится задавать произвольно. После этого начальная характеристическая функция определяется так же, как и в предыдущем случае. Все последовательности величин $\{\delta_k\}$, $\{\gamma_k\}$ и $\{g_{1,k}\}$ можно вычислить изложенным методом заранее. Тогда процесс оценивания последовательности величин $\{X_k\}$ сведется к применению рекуррентной формулы (8).

В условиях теоремы 2.2 для получения уравнений УОФ, во-первых, следует ввести расширенный вектор наблюдения $\bar{Y}_k = [Y_k^T W_k^T]^T$ и, во-вторых, обратить внимание на то, что оценке подлежат не все компоненты $\bar{Y}_k$, а только те, которые соответствуют Y_k . При этом для вычисления коэффициентов линеаризации необходимы соответствующие соотношения для m_{k+1} и K_{k+1} .

Аналогично выводятся уравнения УОФ в условиях теорем 2.3 и 2.4.

4 Дискретная условно-оптимальная экстраполяция

Применяя теорию УОЭ [1] к приведенным уравнениям

$$X_{k+1} = \omega_k(X_k, V_k); \quad Y_k = \omega_{1k}(X_k, Y_k, V_k), \quad (9)$$

получим

$$\hat{X}_{k+\tau+1} = \delta_k \zeta_k(X_k, \hat{X}_k) + \gamma_k. \quad (10)$$

Здесь

$$\gamma_k = m_{k+\tau+1} - \delta_k \rho_k, \quad \delta_k = D_k B_k^{-1}, \quad (11)$$

где

$$m_{k+\tau+1} = M X_{k+\tau+1}; \quad (12)$$

$$\rho_k = M \zeta_k(X_k, \hat{X}_k); \quad (13)$$

$$D_k = M (X_{k+\tau+1} - m_{k+\tau+1}) \zeta_k(X_k, \hat{X}_k); \quad (14)$$

$$B_k = M [\zeta_k(X_k, U \hat{X}_k) - \rho_k] \zeta_k(X_k, \hat{X}_k)^T. \quad (15)$$

После подстановки в (12) и (14) первого уравнения (9) для момента времени $k + \tau + 1$ получаем

$$m_{k+\tau+1} = M \omega_{k+\tau}(X_{k+\tau}, V_{k+\tau}); \quad (16)$$

$$D_k = M [\omega_{k+\tau}(X_{k+\tau}, V_{k+\tau}) - m_{k+\tau+1}] \zeta_k \left(\omega_k(X_k, \hat{X}_k) \right)^T. \quad (17)$$

Из формул (13) и (14) следует, что для вычисления математических ожиданий достаточно знать распределения V_k и совместное одномерное распределение X_k и $\hat{X}_k$. Для вычисления математических ожиданий в (16) и (17) потребуется определить совместное распределение $X_k, X_{k+\tau}$ и $\hat{X}_k$. Зададим его следующей характеристической функцией:

$$g_{2,k,k+\tau}(\lambda_1, \lambda_2, \mu) = M \exp \left\{ i \lambda_1^T X_k + i \lambda_2^T X_{k+\tau} + i \mu^T \hat{X}_k \right\}.$$

Эта функция будет удовлетворять рекуррентному уравнению

$$g_{2,k,k+\tau+1}(\lambda_1, \lambda_2, \mu) = M \exp \left\{ i \lambda_1^T X_k + i \lambda_2^T \omega_{k+\tau}(X_{k+\tau}, V_{k+\tau}) + i \mu^T \hat{X}_k \right\} \quad (18)$$

при начальном условии

$$g_{2,k,k}(\lambda_1, \lambda_2, \mu) = g_{1,k}(\lambda_1 + \lambda_2, \mu). \quad (19)$$

Теорема 4.1 Пусть векторный дискретный СтП $[X_k^T Y_k^T]$ определяется уравнениями негауссовской нелинейной регрессионной СтС (9) и имеет конечные одно- и двумерные моменты. Тогда если матрица B_k невырождена, то дискретный УОЭ (10) определяется рекуррентным образом уравнениями (11) с учетом (13)–(19).

Уравнения теоремы 4.1 могут быть решены только итеративно, поскольку δ_k и γ_k зависят от $g_{2,k,k+\tau}(\lambda_1, \lambda_2, \mu)$. Можно предложить следующий итеративный процесс вычислений: сначала находятся δ_k , γ_k и $g_{1,k}$ для $\tau = 0$, а затем $g_{2,k,k+\tau}$ определяется в первом приближении, далее строится второе приближение δ_k , γ_k и $g_{1,k}$ и т. д.

Аналогично для приведенных систем формулируются теоремы об УОЭ в условиях теорем 2.1–2.4.

5 Дискретная условно-оптимальная интерполяция

В случае условно-оптимальной прямой интерполяции (УОПИ) обозначим через $\hat{X}_{S|k}$ оценку вектора X_S по текущим наблюдениям $Y_1^k = \{Y_i, i = \overline{1, k}\}$, $k \geq S$. Согласно принципу условно-оптимального оценивания определим класс допустимых оценок $\hat{X}_{S|k}$ разностным уравнением УОПИ

$$\hat{X}_{S|k} = \delta_k \zeta_k(Y_{k+1}, \hat{X}_{S|k}) + \gamma_k, \quad k \geq S, \quad (20)$$

при заданной последовательности функций $\{\zeta_k\}$ и всех возможных значениях структурных коэффициентов δ_k и γ_k размерности $n_x \times q$ и $n_x \times 1$ соответственно. Начальное условие для уравнений (20) имеет вид $\hat{X}_S = \hat{X}_{S|S}$ и находится из решения известной задачи УОФ.

Пусть ковариационная матрица K_{ζ_k} случайного вектора $\zeta_k = \zeta_k(Y_{k+1}, \hat{X}_{S|k})$ — положительно определенная матрица при всех $k \geq S$. Относительно функций ω_k^{Π} , ω_{1k} и ζ_k будем в дальнейшем полагать, что они обеспечивают существование всех моментов конечного порядка составного случайного вектора $[X_k^T \hat{X}_{S|k}^T]^T$ при всех $k \geq S$. Принимая уравнение (20) как уравнение линейной регрессии случайного вектора X_S на случайный вектор $\zeta_k(Y_{k+1}, \hat{X}_{S|k})$, получаем следующее утверждение.

Теорема 5.1. Пусть в условиях теоремы 3.1 оценка $\hat{X}_{S|k}$ вектора X_S по наблюдениям Y_1^k , $k \geq S$, ищется в классе оценок, определяемых уравнением нелинейного УОПИ вида (20). Тогда оптимальные значения коэффициентов δ_k и γ_k для УОПИ существуют и определяются уравнениями

$$\delta_k R_k = L_k; \quad \gamma_k = r_k - \delta_k \rho_k, \quad (21)$$

где введены следующие обозначения:

$$R_k = M \zeta_k^0 \zeta_k^{0T}, \quad \zeta_k^0 = \zeta_k - m_{\zeta_k} = \zeta_k - \rho_k, \quad \zeta_k = \zeta_k(Y_{k+1}, \hat{X}_{S|k}); \\ L_k = M X_S^0 \zeta_k^{0T}; \quad r_k = M X_k; \quad \rho_k = M \zeta_k.$$

Для вычисления R_k , L_k , r_k и ρ_k достаточно знать одномерное распределение случайного вектора $[X_k^T \hat{X}_{S|k}^T]^T$ в каждый момент времени $k \geq S$.

В задаче условно-оптимальной интерполяции с фиксированной задержкой (УОИФЗ) определим класс допустимых оценок $\hat{X}_{k|k+\tau}$ разностным уравнением

$$\hat{X}_{k+1|k+1+\tau} = \delta_k \zeta_k(\hat{X}_{k+\tau|k+1+\tau}) + \gamma_k, \quad k \geq k_0, \quad (22)$$

с начальным условием $\hat{X}_{k_0|k_0+\tau}$, которое находится из решения задачи УОПИ. Принимая уравнение (22) как уравнение линейной регрессии случайного вектора X_{k+1} на случайный вектор $\zeta_k(\hat{X}_{k|k+\tau}, Y_{k+1+\tau})$ и используя уравнения (21), приходим к следующей теореме.

Теорема 5.2. Пусть в условиях теорем 3.1 и 5.1 оценка $\hat{X}_{k|k+\tau}$ наблюдаемого вектора X_k по наблюдениям $Y_1^{k+\tau}$ ищется в классе оценок, определяемых уравнением (22). Тогда оптимальные значения коэффициентов δ_k и γ_k для УОИФЗ существуют и удовлетворяют уравнениям (21) с функциями

$$\left. \begin{aligned} R_k &= M \zeta_k \zeta_k^T = K_{\zeta_k}; \quad L_k = M X_{k+1}^0 \zeta_k^{0T}, \quad r_k = M X_{k+1} = m_{X_{k+1}}, \\ \zeta_k^0 &= \zeta_k - \rho_k, \quad \rho_k = M \zeta_k, \quad \zeta_k = \zeta_k(Y_{k+1+\tau}, \hat{X}_{k|k+\tau}). \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Для нахождения R_k , L_k , r_k и ρ_k достаточно знать распределение случайного вектора $[X_k^T X_{k+\tau}^T \hat{X}_{k|k+\tau}^T]^T$ при $k \geq k_0$ и распределения величин V_k , $k \geq k_0$, которые по предположению известны. Распределение начального значения этого вектора находится из решения задачи УОПИ.

В случае условно-оптимальной обратной интерполяции (УООИ) можно также строить рекуррентные алгоритмы оценивания по фиксированным наблюдениям, т. е. после завершения эксперимента. Приведем уравнения УООИ. С этой целью обозначим через $\hat{X}_{k|N}$ оценку вектора X_k по наблюдениям Y_1^N и определим класс допустимых оценок разностным уравнением УООИ

$$\hat{X}_{k|N} = \delta_k \zeta_k(\hat{X}_{k+1|N}) + \gamma_k$$

с граничным условием $\hat{X}_N = \hat{X}_{N|N}$, которое находится при решении задачи дискретной УОФ.

Теорема 5.3. Пусть в условиях теоремы 3.1 оценка $\hat{X}_{k|N}$ вектора X_k по наблюдениям Y^N ищется в классе оценок, определяемых (23). Тогда оптимальные значения коэффициентов δ_k и γ_k для УООИ существуют и удовлетворяют уравнениям УОПИ при $\zeta_k = \zeta_k(\hat{X}_{k+1|N})$. Для нахождения R_k , L_k , r_k и ρ_k достаточно знать распределение случайного вектора $[X_k^T \hat{X}_{k+1|N}^T]^T$ в каждый

момент времени $k = \overline{1, N-1}$. При этом распределение граничного значения $[X_{N-1}^T \hat{X}_{N|N}^T]^T$ находится с использованием уравнений дискретной УОФ.

Замечание 5.1. Рассмотренные три вида УОИ требуют для своей реализации три различных алгоритма, каждый из которых должен проектироваться совместно с УОФ. Как и в теории дискретной УОФ, все сложные вычисления, связанные с нахождением $R_k, L_k, r_k, \rho_k, \delta_k$ и γ_k , основаны только на априорной информации о модели наблюдаемой системы и не используют результатов наблюдений. Поэтому они могут быть выполнены заранее в процессе проектирования дискретного интерполятора с использованием программных средств для решения задач статистического анализа СтП, описываемых разностными уравнениями. Кроме того, изложенная теория позволяет в процессе проектирования определять средний квадрат ошибки оценивания и, например исходя из этого, выбирать подходящий дискретный условно-оптимальный интерполятор. Сам же процесс оценивания (прямой интерполяции или интерполяции с фиксированной задержкой) может быть осуществлен в реальном масштабе времени непосредственно в процессе проведения экспериментов.

6 Применение к авторегрессионным приведенным уравнениям

Для синтеза УОФ (см. разд. 3) в условиях теоремы 2.1, если ввести составной вектор $\bar{X} = [X_k^T, U_k^T]^T$ и положить

$$\bar{\omega}_k^\Pi = [(\omega_k^\Pi)^T (\omega_{1k}^\Pi)^T]^T,$$

где

$$\begin{aligned} \omega_k^\Pi(\bar{X}_k, m_{k+1}, K_{k+1}) &= \varphi_k^\Pi(\bar{X}_k, m_{k+1}, K_{k+1}) + \psi_K^\Pi(\bar{X}_k, m_{k+1}, K_{k+1})V_k; \\ \omega_{1k}^\Pi &\equiv \omega_{1k}^\Pi(\bar{X}_k, V_k), \end{aligned}$$

то структурные функции ζ_k следует взять линейными относительно Y_k :

$$\zeta_k(Y_k, \hat{X}_k) = [\xi_k(\hat{X}_k)^T \ Y_k^T \eta_k(\hat{X}_k)^T]^T.$$

Разбив матрицу коэффициентов δ_k на блоки, $\delta_k = [\alpha_k \ \beta_k]$, можно представить уравнение дискретного фильтра Пугачёва в виде

$$\hat{X}_{k+1} = \alpha_k \xi_k(\hat{X}_k) + \beta_k \eta_k(\hat{X}_k) Y_k + \gamma_k.$$

Здесь $\xi_k = \xi_k(\hat{X}_k)$ и $\eta_k = \eta_k(\hat{X}_k)$ — известные структурные функции фильтра; α_k, β_k и γ_k — коэффициенты фильтра. В этом случае имеем

$$\rho_k = \begin{bmatrix} \rho_1^{(k)T} & \rho_2^{(k)T} \end{bmatrix}^T, \quad \rho_1^{(k)} = M \xi_k(\hat{X}_k), \quad \rho_2^{(k)} = M \eta_k(\hat{X}_k) \varphi_{1k}(\bar{X}_k);$$

$$B_k = \begin{bmatrix} \kappa_{11}^{(k)} & \kappa_{12}^{(k)} \\ \kappa_{21}^{(k)} & \kappa_{22}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad \det |B_k| \neq 0,$$

$$\kappa_{11}^{(k)} = M \left[\xi_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right) - \rho_1^{(k)} \right] \xi_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right)^T,$$

$$\kappa_{12}^{(k)} = \kappa_{21}^{(k)T} = M \left[\xi_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right) - \rho_1^{(k)} \right] \varphi_{1k}^\Pi \left(\bar{X}_k \right)^T \eta_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right)^T,$$

$$\begin{aligned} \kappa_{22}^{(k)} = M \left[\eta_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right) \varphi_{1k}^\Pi \left(\bar{X}_k \right) - \rho_2^{(k)} \right] \varphi_{1k}^\Pi \left(\bar{X}_k \right)^T \eta_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right)^T + \\ + M \eta_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right) \psi_{1k}^\Pi \left(\bar{X}_k \right) \nu_k \psi_{1k}^\Pi \left(\bar{X}_k \right)^T \eta_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right)^T; \end{aligned}$$

$$D_k = \begin{bmatrix} \kappa_{01}^{(k)} & \kappa_{02}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad \kappa_{01}^{(k)} = M \left[\varphi_k^\Pi \left(\bar{X}_k \right) - m_{k+1} \right] \xi_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right)^T,$$

$$\begin{aligned} \kappa_{02}^{(k)} = M \left[\varphi_k^\Pi \left(\bar{X}_k \right) - m_{k+1} \right] \varphi_{1k}^\Pi \left(\bar{X}_k \right)^T \eta_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right)^T + \\ + M \psi_k^\Pi \left(\bar{X}_k \right) \nu_k \psi_{1k}^\Pi \left(\bar{X}_k \right)^T \eta_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right)^T; \end{aligned}$$

$$m_{k+1} = \rho_0^{(k)}, \quad \rho_0^{(k)} = M \varphi_k^\Pi \left(\bar{X}_k \right),$$

где $M V_k = 0$; $M V_k V_k^T = \nu_k$ — ковариация белого шума V_k .

Матрица коэффициентов фильтра $\delta_k = [\alpha_k \beta_k]$ определяется уравнениями:

$$\alpha_k \kappa_{11}^{(k)} + \beta_k \kappa_{21}^{(k)} = \kappa_{01}^{(k)}; \quad \alpha_k \kappa_{12}^{(k)} + \beta_k \kappa_{22}^{(k)} = \kappa_{02}^{(k)}, \quad (24)$$

а вектор смещения γ_k — формулой

$$\gamma_k = \rho_0^{(k)} - \alpha_k \rho_1^{(k)} - \beta_k \rho_2^{(k)}. \quad (25)$$

При этом справедливо следующее рекуррентное уравнение для одномерной характеристической функции $[\bar{X}_k^T \hat{\bar{X}}_k^T]^T$:

$$\begin{aligned} g_{1,k+1}(\lambda, \mu) = M \left\{ i\lambda^T \left[\varphi_k^\Pi \left(\bar{X}_k \right) + \psi_k^\Pi \left(\bar{X}_k \right) V_k \right] + \right. \\ + i\mu^T \left[\alpha_k \xi_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right) + \beta_k \zeta_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right) \varphi_{1k}^\Pi \left(\bar{X}_k \right) + \right. \\ \left. \left. + \beta_k \eta_k \left(\hat{\bar{X}}_k \right) \psi_{1k}^\Pi \left(\bar{X}_k \right) V_k + \gamma_k \right] \right\}. \quad (26) \end{aligned}$$

Но величины $\bar{X}_k$ и $\hat{\bar{X}}_k$ независимы от V_k . Следовательно, условное математическое ожидание $M \exp \{ [i\lambda^T \psi_k^\Pi(\bar{X}_k) + i\mu^T \eta_k(\hat{\bar{X}}_k) \psi_{1k}^\Pi(\bar{X}_k)] V_k \mid \bar{X}_k, \hat{\bar{X}}_k \}$ совпадает

с безусловным математическим ожиданием, представляющим собой значение характеристической функции $h_k(\lambda')$ СВ V_k при

$$\lambda' = \psi_k^\Pi(\bar{X}_k)^\top \lambda + \psi_{1k}^\Pi(\bar{X}_k)^\top \eta_k(\hat{\hat{X}}_k)^\top \mu.$$

Учитывая это, представим (26) в виде

$$g_{1,k+1}(\lambda, \mu) = M h_k \left(\psi_k^\Pi(\bar{X}_k)^\top \lambda + \psi_{1k}^\Pi(\bar{X}_k)^\top \eta_k(\hat{\hat{X}}_k) \beta_k^\top \mu \right) \times \\ \times \exp \left\{ i \lambda^\top \varphi_k^\Pi(\bar{X}_k) + i \mu^\top [\alpha_k \xi_k(\hat{\hat{X}}_k) + \beta_k \eta_k(\hat{\hat{X}}_k) \varphi_{1k}^\Pi(\bar{X}_k) + \gamma_k] \right\}. \quad (27)$$

Уравнения (24), (25) и (27) определяют рекуррентный процесс вычисления $g_{1,k+1}$, α_{k+1} , β_{k+1} и γ_{k+1} по известным $g_{1,k}$, α_k и β_k . Для начала процесса необходимо задать характеристическую функцию $g_{1,1}(\lambda, \mu)$ величин $\bar{X}_1$ и $\hat{\hat{X}}_1$ (**теорема 6.1**).

Для синтеза УОЭ (см. разд. 4) в условиях теоремы 2.2 используются следующие соотношения (**теорема 6.2**):

$$X_{k+1} = \varphi_k^\Pi(\bar{X}_k) + \psi_k^\Pi(\bar{X}_k) V_k; \quad Y_k = \varphi_{1k}^\Pi(\bar{X}_k, Y_k) + \psi_{1k}^\Pi(Y_k) V_k; \\ \hat{\hat{X}}_{k+\tau+1} = \alpha_k \xi_k(\hat{\hat{X}}_k) + \beta_k \eta_k(\hat{\hat{X}}_k) Y_k + \gamma_k; \\ \alpha_k \kappa_{11}^{(k)} + \beta_k \kappa_{21}^{(k)} = \kappa_{01}^{(k)}; \quad \alpha_k \kappa_{12}^{(k)} + \beta_k \kappa_{22}^{(k)} = \kappa_{02}^{(k)}; \\ \gamma_k = \rho_0^{(k+\tau+1)} - \alpha_k \rho_1^{(k)} - \beta_k \rho_2^{(k)}, \quad \rho_0^{(k+\tau+1)} = M \varphi_{k+\tau}^\Pi(\bar{X}_{k+\tau}); \\ \rho_k = \begin{bmatrix} \rho_1^{(k)\top} & \rho_2^{(k)\top} \end{bmatrix}^\top, \quad \rho_1^{(k)} = M \xi_k(\hat{\hat{X}}_k), \quad \rho_2^{(k)} = M \eta_k(\hat{\hat{X}}_k) \varphi_{1k}^\Pi(\bar{X}_k),$$

а также уравнения теоремы 4.1 для одно- и двумерных характеристических функций.

Замечание 6.1. В случае нормальных УОФ и УОЭ соответствующие результаты приведены в [5, 6].

Замечание 6.2. Аналогично рассматриваются УОФ и УОЭ в условиях СтС теоремы 2.2, если ввести составной вектор $\bar{X}_k = [X_k^\top U_k^\top W_k^\top V_k^\top]^\top$.

7 Заключение

Для задач реального времени дискретных неявных гауссовских и негауссовских СтС, приводимых к явным, разработаны нелинейные условно-оптимальные по Пугачёву (в среднеквадратичном смысле) методы синтеза фильтров для рекуррентной оценки (фильтрации) состояния, экстраполяции и интерполяции,

основанные на эквивалентной линеаризации неявных существенно нелинейных соотношений относительно старших разностей (дискретных переменных состояния). В качестве примеров для приведенных СтС могут быть использованы материалы в [1], а также авторегрессионные системы [5, 6].

Заслуживают дальнейшего развития обобщения методов [7, 8], а также [9–14].

Представляют интерес разработки фильтров по различным байесовым критериям, а также оценки точности фильтров для негауссовских параметризованных распределений.

Литература

1. Сеницын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачёва. — 2-е изд. — М.: Логос, 2007. 776 с.
2. Jazwinski A. H. Stochastic processes and filtering theory. — New York, NY, USA: Academic Press, 1970. 428 p.
3. Сеницын И. Н., Шин В. И. Условно оптимальная фильтрация процессов в стохастических дифференциальных системах по сложным статистическим критериям // Докл. Акад. наук СССР, 1991. Т. 320. № 4. С. 814–817.
4. Менхо О., Сеницын И. Н., Шин В. И. Условно оптимальная интерполяция с фиксированной точкой процессов в стохастических дифференциальных системах // Автоматика и телемеханика, 1997. № 2. С. 88–100.
5. Сеницын И. Н. Методы вероятностного и статистического моделирования неявных стохастических систем // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 48–66.
6. Сеницын И. Н. Условно-оптимальная фильтрация и экстраполяция в наблюдаемых неявных стохастических системах // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 4 (в печати).
7. Липцер Р. Ш., Ширяев А. Н. Статистика случайных процессов (нелинейная фильтрация и смежные вопросы). — Сер. Теория вероятностей и математическая статистика. — М.: Наука, 1974. 696 с.
8. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Пер. с англ. — М.: Наука, 1991. 432 с. (Ljung L. System identification: Theory for the user. — Prentice-Hall, Inc., 1987. 519 p.)
9. Толстоногов А. А., Финогенко И. А. О функционально-дифференциальных включениях в банаховых пространствах с невыпуклой правой частью // Докл. Акад. наук СССР, 1980. Т. 245. № 1. С. 45–49.
10. Финогенко И. А. К вопросу о решениях функционально-дифференциальных включений // Прикладная математика и пакеты прикладных программ. — Иркутск: СЭИСО АН СССР, 1980. С. 95–107.
11. Финогенко И. А. Свойства множества решений функционально-дифференциальных включений // Краевые задачи. — Пермь: ППИ, 1981. С. 145–149.
12. Колмановский В. Б., Носов В. Р. Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последействием. — М.: Наука, 1981. 448 с.
13. Финогенко И. А. О неявных функционально-дифференциальных уравнениях в банаховом пространстве // Динамика нелинейных систем. — Новосибирск: Наука, 1983. С. 151–164.

14. Азбелев Н. В., Максимов В. П., Рахматулина Л. Ф. Введение в теорию функционально-дифференциальных уравнений. — М.: Наука, 1991. 277 с.

Поступила в редакцию 17.06.24

DISCRETE CONDITIONALLY-OPTIMAL ESTIMATION IN OBSERVABLE IMPLICIT STOCHASTIC SYSTEMS

I. N. Sinitsyn

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The paper is devoted to the approximate methods of nonlinear conditionally-optimal (by Pugachev) estimation (filtering, extrapolation, and interpolation) of stochastic processes in discrete implicit stochastic systems (StS) reducible to explicit StS. The methods are based on equivalent linearization of implicit functions. It is supposed that observations do not influence objects and are described by nonlinear equations with noncorrelated and autocorrelated noises. A survey of publications in the field of conditionally-optimal filtering and extrapolation for explicit and implicit StS is given. Two discrete mathematical models of implicit StS and equivalent linearization methods are considered. For reducible implicit StS, conditionally-optimal filtering and extrapolation basic algorithms are presented. Special attention is paid to the known types of interpolation. Implementation to reduced autoregression equations is presented. Main conclusions and directions of future investigation are discussed.

Keywords: autoregression system; conditionally-optimal extrapolator (COE); conditionally-optimal filter (COF); conditionally-optimal interpolator; discrete filter; observable implicit stochastic systems; stochastic systems (StS)

DOI: 10.14357/08696527240402

EDN: TLHYYA

References

1. Sinitsyn, I. N. 2007. *Fil'try Kalmana i Pugacheva* [Kalman and Pugachev filters]. 2nd ed. Moscow: Logos. 776 p.
2. Jazwinski, A. H. 1970. *Stochastic processes and filtering theory*. New York, NY: Academic Press. 428 p.
3. Sinitsyn, I. N., and V. I. Shin. 1992. Conditionally optimal filtering of processes in stochastic differential systems by complex statistical criteria. *Soviet Mathematics Doklady* 44(2):554–557.
4. Menkho, O., I. N. Sinitsyn, and V. I. Shin. 1997. Conditionally optimal interpolation with fixed process point in stochastic differential systems. *Automat. Rem. Contr.* 58(2):224–233. EDN: LELCLF.

5. Sinitsyn, I. N. 2024. Metody veroyatnostnogo i statisticheskogo modelirovaniya neyavnykh stokhasticheskikh sistem [Probabilistic and statistical modeling methods for implicit stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(3):48–66.
6. Sinitsyn, I. N. 2024 (in press). Uslovno-optimal'naya fil'tratsiya i ekstrapolyatsiya v nablyudaemykh neyavnykh stokhasticheskikh sistemakh [Conditionally optimal filtering and extrapolation in observable implicit stochastic systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18(4).
7. Liptser, R. S., and A. N. Shiryaev. 1974. *Statistika sluchaynykh protsessov (nelineynaya fil'tratsiya i smezhnye voprosy)* [Statistics of random processes. Nonlinear filtering and related problems]. Ser. "Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika" [Probability theory and mathematical statistics ser.]. Moscow: Nauka. 696 p.
8. Ljung, L. 1987. *System identification: Theory for the user*. Prentice-Hall, Inc. 519 p.
9. Tolstonogov, A. A., and I. A. Finogenko. 1980. On functional-differential inclusions in a Banach space with a nonconvex right-hand side. *Soviet Mathematics Doklady* 22:320–324.
10. Finogenko, I. A. 1980. K voprosu o resheniyakh funktsional'no-differentsial'nykh vkl'yucheniy [On the issue of solutions of functional-differential inclusions]. *Prikladnaya matematika i pakety prikladnykh programm* [Applied mathematics and application software packages]. Irkutsk: SEISO AN SSSR. 95–107.
11. Finogenko, I. A. 1981. Svoystva mnozhestva resheniy funktsional'no-differentsial'nykh vkl'yucheniy [Properties of the solution set of functional differential inclusions]. *Kraevye zadachi* [Boundary value problems]. Perm: PPI. 145–149.
12. Kolmanovskiy, V. B., and V. R. Nosov. 1981. *Ustoychivost' i periodicheskie rezhimy reguliruemyykh sistem s posledstviem* [Stability and periodic modes of regulated systems with consequences]. Moscow: Nauka. 448 p.
13. Finogenko, I. A. 1983. O neyavnykh funktsional'no-differentsial'nykh uravneniyakh v banakhovom prostranstve [On implicit functional differential equations in a Banach space]. *Dinamika nelineynykh sistem* [Dynamics of nonlinear systems]. Novosibirsk: Nauka. 151–164.
14. Azbelev, N. V., V. P. Maksimov, and L. F. Rakhmatulina. 1991. *Vvedenie v teoriyu funktsional'no-differentsial'nykh uravneniy* [Introduction to the theory of functional differential equations]. Moscow: Nauka. 277 p.

Received June 17, 2024

Contributor

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОРОГОВОГО ПАРАМЕТРА RED-ПОДОБНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДЬЮ МОДЕЛИ $G/M/1$

Я. М. Агаларов¹

Аннотация: Рассматривается задача расчета оптимального порогового значения RED-подобного алгоритма для системы массового обслуживания (СМО) $G/M/1$ с неполным обновлением очереди и вероятностным сбросом заявок. RED-подобный алгоритм использует однопороговый механизм вероятностного сброса заявок из очереди, согласно которому в каждый момент освобождения обслуживающего прибора с заданной вероятностью сбрасывается часть заявок из очереди. Заявки занимают очередь в порядке поступления, и те, у которых в моменты освобождения обслуживающего прибора номер очереди больше заданного порогового значения (находятся в «зоне перегрузки»), с заданной вероятностью сбрасываются. Предполагается, что «зона перегрузки» имеет ограниченное число мест, и если в момент поступления заявки в «зону перегрузки» нет свободных мест, то заявка сбрасывается. Целевая функция представляет собой взвешенную сумму среднего времени задержки заявки, среднего числа сбрасываемых из очереди в единицу времени заявок, среднего числа отклоняемых на входе в единицу времени заявок, среднего времени простоя прибора, оплаты обслуживания заявок. Сформулирована математическая задача оптимизации целевой функции по пороговому значению при фиксированном размере «зоны перегрузки». Приведены доказательства некоторых соотношений между характеристиками СМО и унимодальности целевой функции по пороговому значению. Предложен простой алгоритм гарантированного решения сформулированной задачи.

Ключевые слова: управление очередью; обновление очереди; пороговый параметр

DOI: 10.14357/08696527240403

EDN: VLYKTK

1 Введение

Выполнение требований к качеству обслуживания (QoS, quality of service) в современных сетях передачи данных невозможно без решения проблемы сетевых перегрузок, возникшей с самого начала появления сетей передачи данных и остающейся актуальной и в настоящее время. Одним из таких механизмов контроля перегрузок, который широко используется в современных сетях, служит механизм активного управления очередью (Active Queue Management — AQM), в частности алгоритмы RED (Random Early Detection) [1] и RED-подобные

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, agglar@yandex.ru

алгоритмы [2], которые используют пороговые управляющие параметры. Суть этих алгоритмов заключается в том, что для параметра текущей загруженности системы назначается одно или несколько пороговых значений (контрольных точек переключения) и, когда загруженность достигает какого-либо порогового значения, в системе меняются определенным образом правила сброса поступающих пакетов с целью обеспечения выполнения основных требований к качеству QoS (задержка пакетов, разброс задержки, вероятность потерь и др.). В научных публикациях предложено множество различных модификаций RED-алгоритмов, наиболее упоминаемые из которых Tail-Drop («отбрасывание хвоста») [1, 3, 4], RED [1, 5], FRED (Flow Random Early Drop) [6], WRED (Weighted RED) [7], Blue [7], SFB (Stochastic Fair Blue) [8], CBT (Class-Based Threshold) [9], CHOCe (CHOCe and Keep) [10]. В работе [11] приведена достаточно подробная классификация модификаций RED-алгоритмов. Системы массового обслуживания с управляемыми очередями рассмотрены в работе [2], в которой проведен также краткий обзор RED-подобных алгоритмов и для некоторых моделей приведены аналитические результаты.

Основной целью оптимизации механизмов AQM ставится выбор значений управляющих параметров (вероятности сброса, пороговых значений, частоты обновления значений управляющих параметров и т. д.), от которых зависят параметры QoS. Для некоторых управляющих параметров значения должны быть компромиссными, так как их изменения могут одновременно вызвать улучшение одних и ухудшение других параметров QoS, что усложняет задачу выбора оптимальных значений параметров. Решение общей задачи оптимизации механизмов AQM сети с учетом взаимозависимостей параметров узлов не представляется возможным из-за большой сложности, поэтому исследователи изучают свойства механизмов AQM с использованием математических моделей отдельных фрагментов сети, в частности моделей СМО. По анализу СМО с управляемыми очередями очень много публикаций, и аналитические результаты для этих систем в основном получены для моделей с заданными значениями управляющих параметров [11–16], а в работах, посвященных оптимизации механизмов AQM (например, [17, 18]), в качестве переменных управляющих параметров рассматривались интервалы обновления или вероятности сброса заявок, а пороговые значения (точки переключения) считались фиксированными. Очевидно, такие показатели качества работы СМО, как доля потерь заявок, задержки заявок и время простоя приборов, зависят и от установленного в AQM порогового значения, и поэтому изучение поведения указанных показателей при изменении порогового значения вызывает определенный исследовательский интерес. При поиске результатов по данной тематике автору не встречались работы, в которых получены теоретические результаты по решению данной многокритериальной оптимизационной задачи для СМО с обновлением и пороговым управлением очередью. В случае СМО типа $G/M/1$, $M/G/1/N$ и $M/M/s/N$ без обновления очереди аналитическое исследование проводилось и получены некоторые теоретические результаты (см., например, [19, 20]).

В настоящей работе исследуется задача поиска оптимального порогового значения RED-подобного алгоритма для модели $G/M/1$ с неполным обновлением очереди и вероятностным сбросом заявок. В качестве целевой функции используется взвешенная сумма среднего времени задержки заявки, среднего числа сбрасываемых из очереди в единицу времени заявок, среднего числа отклоняемых на входе в единицу времени заявок, среднего времени простоя прибора и оплаты обслуживания заявок.

2 Описание системы и постановка задачи

Рассматривается СМО с накопителем неограниченной емкости и одним прибором обслуживания, на которую поступает рекуррентный поток заявок с функцией распределения вероятностей $A(t)$, $\bar{v} = \int_0^\infty t dA(t) < \infty$. Время обслуживания заявки прибором не зависит от входного потока и распределено по экспоненциальному закону с параметром $\mu > 0$. Прием и обслуживание заявок в системе происходит согласно пороговой стратегии управления с «неполным» обновлением следующим образом [2]. Поступившая заявка занимает одно свободное место в накопителе и, если в момент поступления застает прибор свободным, сразу занимает его и начинает обслуживаться, а в противном случае становится в очередь к прибору в порядке поступления. Пусть h_1 и h_2 — целые положительные числа, удовлетворяющие условиям $h_2 - h_1 = a = \text{const} \geq 0$, $h_1 \geq 1$. В дальнейшем h_1 будем называть пороговым значением. Поступившая заявка отклоняется, если длина очереди не меньше чем h_2 , иначе занимает одно свободное место в накопителе и, если в момент поступления застает прибор свободным, сразу занимает его и начинает обслуживаться. Предполагается, что заявки обслуживаются в порядке поступления. Сразу после завершения обслуживания заявка покидает систему, освободив одновременно место в накопителе и прибор, а на прибор поступает очередная заявка из очереди (если таковая есть). Если после окончания обслуживания очередной заявки в системе остается больше чем $h_1 + 1$ ($h_1 \geq 1$) заявок, то с вероятностью $\beta = 1 - \alpha$ все, кроме первых по очереди $h_1 + 1$ заявок, сбрасываются из очереди, иначе заявки из очереди не сбрасываются.

Отметим, что процесс обслуживания заявок в данной системе описывается вложенной цепью Маркова (см., например, [21]), где переходы цепи определяются моментами поступления заявок, а состояние цепи — числом заявок, находящихся в системе в момент поступления.

Будем считать, что в каждом состоянии $0 \leq i \leq h_2$ система получает «доход», выражающийся функцией

$$q_i(h_1, a) = \begin{cases} C_0 - C_1 \bar{W}_{\text{ож}}(i, h_1, a) - C_2 \bar{N}_{\text{сбр}}(i, h_1, a) - C_3 \bar{W}_{\text{прост}}(i, h_1, a) - C_4 \bar{v}, & 0 \leq i < h_2; \\ q_{h_2-1}(h_1, a) - C_0 - C_5, & i = h_2, \end{cases} \quad (1)$$

где $C_0 \geq 0$ — «плата», получаемая системой, если поступившая заявка будет принята в накопитель; $C_1 \geq 0$ — «штраф» за единицу времени ожидания заявки в системе; $C_2 \geq 0$ — «штраф» за сброс одной заявки; $C_3 \geq 0$ — «штраф» за единицу времени простоя прибора; $C_4 \geq 0$ — стоимость затрат в единицу времени из-за технического обслуживания системы; $C_5 \geq 0$ — величина «штрафа», если поступившая заявка отклонена; $\overline{W}_{\text{ож}}(i, h_1, a)$ — среднее суммарное время ожидания в состоянии i обслуженных системой заявок при пороге h_1 ; $\overline{N}_{\text{сбр}}(i, h_1, a)$ — среднее число сброшенных из очереди заявок в состоянии i при пороге h_1 ; $\overline{W}_{\text{прост}}(i, h_1, a)$ — среднее время простоя прибора в состоянии i при пороге h_1 .

Введем обозначения: $\{\pi_i(h_1, a), 0 \leq i \leq h_2\}$ — стационарное распределение вероятностей цепи при пороге h_1 ; $Q(h_1, a)$ — предельное среднее значение «дохода» системы в единицу времени при пороге h_1 ; $g(h_1, a)$ — предельное среднее значение суммарного «дохода» системы, усредненного по числу поступивших заявок при пороге h_1 .

В стационарном режиме работы системы верны равенства:

$$g(h_1, a) = \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1, a) q_i(h_1, a); \quad Q(h_1, a) = \frac{g(h_1, a)}{\overline{v}}.$$

Ставится задача максимизации функции $g(h_1, a)$ ($Q(h_1, a)$) на множестве $N = \{h_1 : h_1 \geq 1\}$: найти оптимальный порог $h_1^* \in N$, такой что

$$h_1^* = \arg \max_{h_1 \in N} g(h_1, a). \quad (2)$$

Всюду ниже для краткости изложения материала в обозначениях параметр a будем опускать.

3 Решение задачи

Как следует из описания упомянутой выше вложенной цепи Маркова, стационарное распределение вероятностей $\{\pi_i(h_1), 0 \leq i \leq h_2\}$ является единственным решением следующей системы уравнений равновесия:

$$\left. \begin{aligned} \pi_0(h_1) &= \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) p_{i0}(h_1); \\ \pi_j(h_1) &= \sum_{i=j-1}^{h_2} \pi_i(h_1) p_{ij}(h_1), \quad j = \overline{1, h_2 - 1}; \\ \pi_{h_2}(h_1) &= \pi_{h_2-1}(h_1) p_{h_2-1, h_2}(h_1) + \pi_{h_2}(h_1) p_{h_2, h_2-1}(h_1); \\ \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) &= 1, \quad \pi_i(h_1) > 0, \quad i = \overline{0, h_2}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}
 p_{ij}(h_1) &= \\
 &= \begin{cases} r_{i+1-j}, & 0 \leq i \leq h_1, 1 \leq j \leq i+1; \\ \beta^{i+1-j} r_{i+1-j}, & h_1 < j \leq i+1 \leq h_2; \\ (1-\beta) \sum_{k=1}^{i-h_1} \beta^{k-1} r_k + \beta^{i-h_1} r_{i+1-j}, & h_1 < i \leq h_2-1, j = h_1; \\ (1-\beta) \sum_{k=1}^{i-h_1} \beta^{k-1} r_{k+h_1-j} + \beta^{i-h_1} r_{i+1-j}, & h_1 < i \leq h_2-1, 1 \leq j < h_1; \\ \sum_{k=i+1}^{\infty} r_k, & 0 \leq i \leq h_1, j = 0; \\ (1-\beta) \sum_{k=1}^{i-h_1} \beta^{k-1} \sum_{l=k+h_1}^{\infty} r_l + \beta^{i-h_1} \sum_{l=i+1}^{\infty} r_l, & h_1 < i \leq h_2-1, j = 0; \end{cases} \\
 p_{h_2j}(h_1) &= p_{h_2-1,j}(h_1) \text{ для } 0 \leq j \leq h_2; \quad r_l = \int_0^{\infty} \frac{(\mu v)^l}{l!} e^{-\mu v} dA(v), \quad l \geq 0.
 \end{aligned}$$

Из уравнений (3), положив $\pi_i(h_1) = R_i(h_1)\pi_{h_2}(h_1)$, получим

$$\left. \begin{aligned} R_{h_2}(h_1) &= 1; \quad R_{h_2-1}(h_1) = \frac{1 - p_{h_2, h_2-1}(h_1)}{p_{h_2-1, h_2}(h_2)}; \\ R_{j-1}(h_1) &= \frac{\pi_j(h_1)[1 - p_{jj}(h_1)] - \sum_{i=j-1}^{h_2} \pi_i(h_1)p_{ij}(h_1)}{p_{j-1, j}(h_1)}, \\ &1 \leq j \leq h_2-1; \\ \pi_{h_2}(h_1) &= \left(1 + \sum_{i=0}^{h_2-1} R_i(h_1)\right)^{-1}; \\ \pi_j(h_1) &= \frac{R_j(h_1)}{1 + \sum_{i=0}^{h_2-1} R_i(h_1)}, \quad j = \overline{0, h_2-1}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Фиксируем состояние i . Найдем аналитические выражения для величин $\overline{W}_{\text{ож}}(i, h_1)$, $\overline{N}_{\text{сбр}}(i, h_1)$, $\overline{W}_{\text{прост}}(i, h_1)$, $i = \overline{0, h_2}$, определяющие средний «доход» $q_i(h_1)$. Так как $\overline{W}_{\text{ож}}(h_2, h_1) = \overline{W}_{\text{ож}}(h_2-1, h_1)$, $\overline{N}_{\text{сбр}}(h_2, h_1) = \overline{N}_{\text{сбр}}(h_2-1, h_1)$ и $\overline{W}_{\text{прост}}(h_2, h_1) = \overline{W}_{\text{прост}}(h_2-1, h_1)$, указанные ниже аналитические выражения находим для $i \leq h_2-1$.

Пусть v — фиксированное значение времени пребывания системы в состоянии i . Пусть заявки, находящиеся в системе в момент перехода в состояние i , условно пронумерованы числами $1, 2, \dots$ в порядке поступления и заявку с номером l назовем l -заявкой. Обозначим через B_m случайное событие, такое что $B_m = \{\tau_1 + \dots + \tau_m \leq v < \tau_1 + \dots + \tau_{m+1}\}$, где τ_i — случайная величина, распределенная по показательному закону с параметром μ ; $W_{l/m}$ — время ожидания l -заявки при условии, что произошло событие B_m . Заметим, что B_m эквивалентно завершению обслуживания ровно m заявок за время v . Известно [21], что условное среднее значение случайной величины $W_{l+1} = \tau_1 + \dots + \tau_l$ при условии, что произошло B_m , равно

$$M[W_{l+1}/m] = \frac{l}{m+1} v, \quad l = \overline{1, m}.$$

Назовем заявку «успешной», если она обслужена системой. Обозначим: $M[W_{\text{ож}}/m]_{i, h_1}$ — суммарное среднее время ожидания «успешных» заявок за время нахождения системы в состоянии i (т. е. за время v) при условии B_m и h_1 ; $M[W_{\text{зан}}/m]_{i, h_1}$ — среднее время занятости прибора в состоянии i при условии B_m и h_1 ; $\overline{W}_{\text{ож}}(i, h_1)$ — безусловное среднее время ожидания «успешных» заявок в состоянии i при h_1 .

Разобьем множество всех возможных состояний системы на три непересекающихся подмножества: $\{i : i \leq h_1\}$, $\{i : h_1 < i \leq 2h_1\}$, $\{i : 2h_1 < i \leq h_2\}$. Рассмотрим каждое подмножество в отдельности и получим аналитические выражения для $\overline{W}_{\text{ож}}(i, h_1)$ и $\overline{W}_{\text{зан}}(i, h_1) = \overline{v} - \overline{W}_{\text{прост}}(i, h_1)$ — среднего времени занятости прибора в состоянии i при пороге h_1 .

1. Пусть $i \leq h_1$. Тогда имеет место равенство

$$\begin{aligned} \overline{W}_{\text{ож}}(i, h_1) &= \sum_{m=0}^i \int_0^{\infty} \left[\sum_{l=1}^m M[W_{l+1}/m] + (i-m)v \right] r_m(v) dA(v) + \\ &\quad + \sum_{m=i+1}^{\infty} \sum_{l=1}^i \int_0^{\infty} M[W_{l+1}/m] r_m(v) dA(v) = \\ &= \frac{1}{2\mu} \left[\sum_{m=1}^{i+1} (2im - (m-1)m)r_m + i(i+1) \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m \right], \quad i \leq h_1, \quad (5) \end{aligned}$$

где $r_m(b) = ((\mu v)^m / m!) e^{-\mu v}$ — распределение Пуассона с параметром μv .

2. Пусть $h_1 < i \leq 2h_1$ (т. е. $i - h_1 \leq h_1$). Обозначим через $M[W_{\text{необ}}/m]_{i, h_1, n}$ — суммарное среднее время ожидания заявок, не приступивших к обслуживанию за время v в состоянии i , но обслуженных впоследствии

(«успешных» заявок), при условии B_m и пороге h_1 , если число не приступивших к обслуживанию в состоянии i заявок равно n . Верно равенство:

$$M[W_{\text{необ}}/m]_{i,h_1,n} = \begin{cases} nv, & n \leq h_1; \\ (h_1 + a_{n-h_1})v, & n > h_1, \end{cases} \quad (6)$$

где $a_{n-h_1} = (1 - \beta) \sum_{l=1}^{n-h_1} \beta^{l-1} l + \beta^{n-h_1} (n - h_1)$ — среднее число не приступивших к обслуживанию за время в состоянии i «успешных» заявок, в очереди перед которыми осталось больше h_1 заявок.

Разобьем область значений m на несколько подобластей и для каждой под-области приведем (опуская вывод) формулу для $M[W_{\text{ож}}/m]_{i,h_1}$:

$$M[W_{\text{ож}}/m]_{i,h_1} = \sum_{l=2}^{m+1} M[W_l/m] + (1 - \beta) \sum_{k=1}^m \beta^{k-1} (k + h_1 - m - 1)v + \\ + \beta^m (h_1 + a_{i-m-h_1})v, \quad 1 \leq m \leq i - h_1 - 1; \quad (7)$$

$$M[W_{\text{ож}}/m]_{i,h_1} = \sum_{l=2}^{m+1} M[W_l/m] + (1 - \beta) \sum_{k=1}^{i-h_1} \beta^{k-1} (k + h_1 - m - 1)v + \\ + \beta^{i-h_1} (i - m)v, \quad i - h_1 \leq m \leq h_1; \quad (8)$$

$$M[W_{\text{ож}}/m]_{i,h_1} = (1 - \beta) \sum_{k=1}^{m-h_1} \beta^{k-1} \sum_{l=2}^{k+h_1} M[W_l/B_m] + \\ + \beta^{m-h_1} \sum_{l=2}^{m+1} M[W_l/B_m] + (1 - \beta) \sum_{k=m-h_1+1}^{i-h_1} \beta^{k-1} (k + h_1 - m - 1)v + \beta^{i-h_1} (i - m), \\ h_1 + 1 \leq m \leq i; \quad (9)$$

$$M[W_{\text{ож}}/m]_{i,h_1} = (1 - \beta) \sum_{k=1}^{i-h_1} \beta^{k-1} \sum_{l=2}^{k+h_1} \frac{l-1}{m+1} v + \beta^{i-h_1} \sum_{l=2}^{i+1} \frac{l-1}{m+1} v, \\ m > i. \quad (10)$$

3. Пусть $2h_1 < i \leq h_2$ (т. е. $i - h_1 > h_1$). Тогда верны равенства:

$$M[W_{\text{ож}}/m]_{i,h_1} = \sum_{l=2}^{m+1} M[W_l/m] + (1 - \beta) \sum_{k=1}^m \beta^{k-1} (k + h_1 - m - 1)v + \\ + \beta^m (h_1 + a_{i-m-h_1})v, \quad 1 \leq m \leq h_1; \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
M[W_{\text{ож}}/m]_{i,h_1} &= (1-\beta) \sum_{k=1}^{m-h_1} \beta^{k-1} \sum_{l=1}^{k+h_1} N[W_l/m] + \beta^{m-h_1} \sum_{l=2}^{m+1} M[W_l/m] + \\
&+ (1-\beta) \sum_{k=m-h_1+1}^m \beta^{k-1} (k+h_1-m-1)v + \beta^m (h_1 + a_{i-m-h_1})v, \\
&h_1 + 1 \leq m \leq i - h_1. \quad (12)
\end{aligned}$$

При $i - h_1 + 1 \leq m \leq i$ имеет место равенство (9), а при $m > i$ для $M[W_{\text{ож}}/B_m]_{i,h_1}$ выполняется равенство (10).

Заметим, что время занятости прибора в период нахождения системы в состоянии i равно времени пребывания в системе последней обслуженной за этот период заявки. Тогда аналогично предыдущим формулам выводим следующую формулу:

$$\begin{aligned}
M[W_{\text{зан}}/m]_{i,h_1} &= \\
&= \begin{cases} v, & 0 \leq m \leq i \leq h_1 \text{ или } m \leq h_1 < i; \\ \frac{i+1}{m+1} v, & i \leq h_1, m > i; \\ (1-\beta) \sum_{k=1}^{m-h_1} \beta^{k-1} M[W_{k+h_1+1}/m] + \beta^{m-h_1} v, & h_1 + 1 \leq m \leq i; \\ (1-\beta) \sum_{k=1}^{i-h_1} \beta^{k-1} M[W_{k+h_1+1}/m] + \beta^{i-h_1} M[W_{i+2}/m], & \\ & m \geq i + 1. \end{cases} \quad (13)
\end{aligned}$$

Из (5)–(13) по формуле полной вероятности получим:

$$\left. \begin{aligned} \overline{W}_{\text{ож}}(i, h_1) &= \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^{\infty} M[W_{\text{ож}}/m]_{i,h_1} r_m(v) dA(v); \\ \overline{W}_{\text{зан}}(i, h_1) &= \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^{\infty} M[W_{\text{зан}}/m]_{i,h_1} r_m(v) dA(v). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Также имеет место равенство

$$\begin{aligned}
\overline{N}_{\text{сбп}}(i, h_1) &= \sum_{m=1}^{i-h_1} \left[(i+1-h_1)(1-\beta^m) - \frac{(m-1)\beta^m - m\beta^{m-1} + 1}{1-\beta} \right] r_m + \\
&+ \sum_{m=i-h_1+1}^{\infty} \left[(i+1-h_1)(1-\beta^{i-h_1}) - \right. \\
&\quad \left. - \frac{(i-h_1-1)\beta^{i-h_1} - (i-h_1)\beta^{i-h_1-1} + 1}{1-\beta} \right] r_m. \quad (15)
\end{aligned}$$

Докажем три утверждения (два вспомогательных и одно основное) о свойствах функций $\overline{W}_{\text{ож}}(i, h_1)$, $\overline{W}_{\text{зан}}(i, h_1)$, $\overline{N}_{\text{сбр}}(i, h_1)$ и $g(h_1)$.

Утверждение 1. *Справедливы равенства*

$$\overline{W}_{\text{ож}}(i+1, h_1+1) - \overline{W}_{\text{ож}}(i, h_1) = \overline{W}_{\text{зан}}(i, h_1), \quad i = \overline{0, h_2}; \quad (16)$$

$$\overline{N}_{\text{сбр}}(i+1, h_1+1) - \overline{N}_{\text{сбр}}(i, h_1) = 0, \quad i = \overline{0, h_2}. \quad (17)$$

Доказательство. При $i \leq h_1$ равенство (16) непосредственно следует из (5), (13) и (14), а при $i > h_1$ и $m \leq h_1$ равенство (16) следует из (6), (8) и (14). Обозначим:

$$\Delta M[W_{\text{ож}}/m]_{i, h_1} = M[W_{\text{ож}}/m]_{i+1, h_1+1} - M[W_{\text{ож}}/m]_{i, h_1}.$$

Рассмотрим $\Delta M[W_{\text{ож}}/m]_{i, h_1}$ при $h_1 < i \leq 2h_1$, $m > h_1$.

Из (8) и (9) следует соотношение:

$$\begin{aligned} \Delta M[W_{\text{ож}}/m]_{i, h_1} &= (1 - \beta)M[W_{h_1+2}/m] + \beta(1 - \beta^{i-h_1-1})v + \beta^{i-h_1}v = \\ &= (1 - \beta)M[W_{h_1+2}/m] + \beta v, \quad m = h_1 + 1 \leq i. \end{aligned}$$

Из (9) при $h_1 + 2 \leq m \leq i$ находим

$$\Delta M[W_{\text{ож}}/m]_{i, h_1} = (1 - \beta) \sum_{k=1}^{m-h_1} \beta^{k-1} M[W_{k+h_1+1}/m] + \beta^{m-h_1}v.$$

Из (9) и (10) при $m = i + 1 = h_1 + 2$ получим

$$\Delta M[W_{\text{ож}}/m]_{i, h_1} = (1 - \beta)M[W_{i+1}/m] + \beta M[W_{i+2}/m].$$

Из (10) при $m > i + 1$ следует

$$\Delta M[W_{\text{ож}}/m]_{i, h_1} = (1 - \beta) \sum_{k=1}^{i-h_1} \beta^{k-1} M[W_{k+h_1+1}/m] + \beta^{i-h_1} M[W_{i+2}/m].$$

Таким образом, в случае $h_1 < i \leq 2h_1$ имеет место равенство:

$$\begin{aligned} &\Delta M[W_{\text{ож}}/m]_{i, h_1} = \\ &= \begin{cases} v, & m \leq h_1; \\ (1 - \beta) \sum_{k=1}^{m-h_1} \beta^{k-1} M[W_{k+h_1+1}/m] + \beta^{m-h_1}v, & h_1 + 1 \leq m \leq i; \\ (1 - \beta) \sum_{k=1}^{i-h_1} \beta^{k-1} M[W_{k+h_1+1}/m] + \beta^{i-h_1} M[W_{i+2}/m], & m \geq i + 1. \end{cases} \end{aligned}$$

Аналогично доказывается справедливость последней формулы и в случае $i > 2h_1$. Как видим, правая часть последнего равенства равна $M[W_{\text{зан}}/m]_{i,h_1}$ (см. (13)). Тогда, воспользовавшись соотношениями (14) и последней формулой, проведя несложные преобразования, получим равенство (16) для $h_1 < i \leq h_2$. Равенство (17) следует непосредственно из (15).

Утверждение 2. *Справедливо равенство*

$$\begin{aligned} & \overline{W}_{\text{зан}}(i+1, h_1+1) - \overline{W}_{\text{зан}}(i, h_1) = \\ & = \begin{cases} \frac{1}{\mu} \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m, & i \leq h_1; \\ \frac{1}{\mu} \left[\sum_{m=h_2+2}^{i+1} r_m (1 - \beta^{m-h_1-1}) + \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m \right], & h_1 < i < h_2. \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

Доказательство. Равенство (18) для $i \leq h_1$ следует из (13) и (14) и определений $r_m(v)$ и r_m в (5) и (3). Для $i > h_1$, воспользовавшись (13), после простых преобразований получим:

$$\begin{aligned} & M[W_{\text{зан}}/m]_{i+1, h_1+1} - M[W_{\text{зан}}/m]_{i, h_1} = \\ & = \begin{cases} (1 - \beta^{m-h_1}) \frac{v}{m+1}, & h_1+1 \leq m \leq i; \\ \frac{v}{m+1}, & m > i+1. \end{cases} \end{aligned}$$

Из (14), определений $r_m(v)$ и r_m и последнего равенства находим (18).

Утверждение 3. *Целевая функция $g(h_1, a)$ — унимодальная функция по h_1 .*

Доказательство. Как следует из (4), справедливо соотношение

$$\pi_{j+1}(h_1+1) = [1 - \pi_0(h_1+1)] \pi_j(h_1), \quad j = \overline{0, h_2}. \quad (19)$$

Проведя простые преобразования с использованием (19), получим:

$$\begin{aligned} & g(h_1, a) - g(h_1+1, a) = \pi_0(h_1+1) \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) q_i(h_1) - \\ & - [1 - \pi_0(h_1+1)] \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) [q_{i+1}(h_1+1) - q_i(h_1)] - \pi_0(h_1+1) q_0(h_1+1). \end{aligned}$$

Далее, вынеся $\pi_0(h_1+1)$ за фигурные скобки в правой части последнего равенства и подставив вместо $q_i(h_1)$ и $q_{i+1}(h_1+1)$ их выражения (1), из утверждений 1 и 2 получим:

$$\begin{aligned}
 g(h_1, a) - g(h_1 + 1, a) = & \\
 = \pi_0(h_1 + 1) & \left\{ g(h_1, a) + C_1 \frac{1 - \pi_0(h_1 + 1)}{\pi_0(h_1 + 1)} \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) \overline{W}_{\text{зан}}(i, h_1) - \right. \\
 - C_3 \frac{1 - \pi_0(h_1 + 1)}{\pi_0(h_1 + 1)} & \left[\sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) [\overline{W}_{\text{зан}}(i, h_1) - \overline{W}_{\text{зан}}(i + 1, h_1 + 1)] \right] - \\
 - C_0 + C_3 \left(\overline{v} - \frac{1 - r_0}{\mu} \right) & \left. \right\}. \quad (20)
 \end{aligned}$$

Обратим внимание, что в (3) имеем

$$\begin{aligned}
 p_{i0}(h_1) &= (1 - \beta) \sum_{k=1}^{i-h_1} \beta^{k-1} \sum_{l=k+h_1}^{\infty} r_l + \beta^{i-h_1} \sum_{l=i+1}^{\infty} r_l = \\
 &= \sum_{m=h_1+1}^{i-h_1} r_m \left(1 - \beta^{m-h_1} \right) + \sum_{l=i+1}^{\infty} r_l \text{ при } h_1 < i \leq h_2 - 1; \\
 p_{h_20}(h_1) &= p_{h_2-1,0}(h_1).
 \end{aligned}$$

Из первого равенства в (3) следует справедливость следующей формулы:

$$\begin{aligned}
 r_0 &= \frac{1}{\pi_0(h_1 + 1)} \sum_{i=1}^{h_2+1} \pi_i(h_1 + 1) p_{i0}(h_1 + 1) = \\
 &= \frac{1 - \pi_0(h_1 + 1)}{\pi_0(h_1 + 1)} \left[\sum_{i=0}^{h_1} \pi_i(h_1) \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m + \right. \\
 &+ \sum_{i=h_1+1}^{h_2-1} \pi_i(h_1) \left[\sum_{m=h_1+2}^{i+1} r_m \left(1 - \beta^{m-h_1-1} \right) + \sum_{m=i+2}^{\infty} r_m + \right. \\
 &\left. \left. + \pi_{h_2}(h_1) \left[\sum_{m=h_1+2}^{h_2} r_m \left(1 - \beta^{m-h_1-1} \right) + \sum_{m=h_2+2}^{\infty} r_m \right] \right] \right].
 \end{aligned}$$

Из утверждения 2 и последнего равенства следует, что имеет место соотношение:

$$\frac{r_0}{\mu} = \frac{1 - \pi_0(h_1 + 1)}{\pi_0(h_1 + 1)} \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) [\overline{W}_{\text{зан}}(i + 1, h_1 + 1) - \overline{W}_{\text{зан}}(i, h_1)]. \quad (21)$$

Из (20), подставив (21), получим

$$g(h_1, a) - g(h_1 + 1, a) = \pi_0(h_1 + 1)[g(h_1, a) - G(h_1, a)], \quad (22)$$

где

$$G(h_1, a) = C_0 - C_3 \left(\bar{v} - \frac{1}{\mu} \right) - C_4 \bar{v} - C_1 \frac{1 - \pi_0(h_1 + 1)}{\pi_0(h_1 + 1)} \sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) \bar{W}_{\text{зан}}(i, h_1).$$

Заметим, что функция $G(h_1, a)$ — невозрастающая функция по h_1 , так как $\sum_{i=0}^{h_2} \pi_i(h_1) \bar{W}_{\text{зан}}(i, h_1)$ — среднее время занятости прибора в произвольно взятом состоянии и возрастает по h_1 , $\pi_0(h_1)$ — убывающая функция по h_1 . Тогда поскольку имеет место соотношение (22), то $g(h_1, a)$ удовлетворяет всем условиям теоремы 1 из [22]. Следовательно, утверждение 3 доказано.

Согласно утверждению 3 результат выполнения следующего алгоритма служит решением задачи (2).

1. Положить $h_1 = 1$.
2. До тех пор пока выполняется условие $Q(h_1 + 1, a) > Q(h_1, a)$, полагать $h_1 = h_1 + 1$.
3. Положить $h_1^* = h_1$.

4 Заключение

Обратим внимание, что задача оптимизации параметров QoS относится к многокритериальным, решение которых в общем виде математическими методами не представляется возможным из-за их сложности. Использование метода скаляризации общей целевой функции в виде взвешенной суммы частных целевых функций относится к числу наиболее применяемых на практике при решении задач многокритериальной оптимизации. Доказанное в данной статье утверждение об унимодальности целевой функции задачи (2) показывает, что в рамках некоторых моделей СМО данный подход прост в реализации и дает гарантированное решение оптимизационной задачи.

В данной работе из-за краткости изложения не приводятся результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующих зависимости характеристик СМО от управляющих параметров a и h_1 . Планируется эти результаты изложить в следующей работе, которая будет посвящена исследованию аналогичной задачи в случае алгоритма с неполным обновлением очереди и двумя пороговыми значениями.

Литература

1. *Floyd S., Jacobson V.* Random early detection gateways for congestion avoidance // IEEE ACM T. Network., 1993. Vol. 1. P. 397–413. doi: 10.1109/90.251892.
2. *Viana C. C. H., Zaryadov I. S., Milovanova T. A.* Queueing systems with different types of renovation mechanism and thresholds as the mathematical models of active queue management mechanism // Discrete Continuous Models Applied Computational Science, 2020. Vol. 28. No. 4. P. 305–318. doi: 10.22363/2658-4670-2020-28-4-305-318.
3. *Kabra M., Saha S., Lin B.* Fast buffer memory with deterministic packet departures // 14th Symposium on High-Performance Interconnects Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006. P. 67–72. doi: 10.1109/HOTI.2006.13.
4. *Zheng B., Atiquzzaman M.* A framework to determine the optimal weight parameter of RED in next-generation Internet routers // Int. J. Commun. Syst., 2008. Vol. 21. P. 987–1008.
5. *Reddy T. B., Ahammed A., Banu R.* Performance comparison of active queue management techniques // Int. J. Computer Science Network Security, 2009. Vol. 9. No. 2. P. 405–408.
6. *Lin D., Morris R.* Dynamics of random early detection // Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 1997. P. 127–137. doi: 10.1145/263109.26315.
7. *Feng W.-C., Shin K. G., Kandlur D. D., Saha D.* The BLUE active queue management algorithms // IEEE ACM T. Network., 2002. Vol. 10. Iss. 4. P. 513–528. doi: 10.1109/TNET.2002.801399.
8. *Feng W.-C., Kandlur D. D., Saha D., Shin K. G.* Stochastic Fair Blue: A queue management algorithm for enforcing fairness // 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. Vol. 3. P. 1520–1529. doi: 10.1109/INFCOM.2001.916648.
9. *Parris M., Jeffay K., Smith F. D.* Lightweight active router-queue management for multimedia networking // Proc. SPIE, 1999. Vol. 3654. P. 162–174. doi: 10.1117/12.333807.
10. *Pan R., Prabhakar B., Psounis K.* CHOKe: A stateless active queue management scheme for approximating fair bandwidth allocation // 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000. Vol. 2. P. 942–951.
11. *Королькова А. В., Кулябов Д. С., Черноиванов А. И.* К вопросу о классификации алгоритмов RED // Вестник РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика, 2009. № 3. С. 34–46. EDN: KXIRXN.
12. *Зарядов И. С., Королькова А. В., Разумчик Р. В.* Математические модели расчета и анализа характеристик систем активного управления очередями с двумя входящими потоками и различными приоритетами // T-Comm, 2012. № 7. С. 107–111. EDN: PWXFSB.
13. *Гайдамака Ю. В., Масленников А. Г.* Об одной системе массового обслуживания с активным управлением очередью // Вестник РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика, 2013. № 4. С. 56–64. EDN: RCKTSD.
14. *Konovvalov M., Razumchik R.* Queueing systems with renovation vs. queues with RED. — Cornell University, 2017. arXiv:1709.01477 [cs.PF]. 10 p.

15. *Konovalov M. G., Razumchik R. V.* Comparison of two active queue management schemes through the $M/D/1/N$ queue // Информатика и её применения, 2018. Т. 12. Вып. 4. С. 9–15. doi: 10.14357/19922264180402. EDN: VOGJOZ.
16. *Konovalov M., Razumchik R.* Numerical analysis of improved access restriction algorithms in a $GI/G/1/N$ system // J. Commun. Technol. El., 2018. Vol. 63. No. 6. P. 616–625. doi: 10.1134/S1064226918060141.
17. *Lie A., Aamo O. M., Rønningen L. A.* Optimization of active queue management based on proportional control system // Conference (International) on Communications, Internet, and Information Technology Proceedings. — St. Thomas, U.S. Virgin Islands: IASTED/ACTA Press, 2004. 6 p.
18. *Baldi S., Kosmatopoulos E. B., Pitsillides A., Lestas M., Ioannou P. A., Wan Y.* Adaptive optimization for active queue management supporting TCP flows // P. Amer. Contr. Conf. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016. P. 751–756. doi: 10.1109/ACC.2016.7525004.
19. *Агаларов Я. М.* Об оптимизации работы резервного прибора в многолинейной системе массового обслуживания // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 1. С. 89–95. doi: 10.14357/19922264230112. EDN: FCYDUT.
20. *Агаларов Я. М.* Об однопороговом управлении очередью в системе массового обслуживания с нетерпеливыми заявками // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 2. С. 40–46. doi: 10.14357/19922264240206. EDN: JZHAKU.
21. *Карлин С.* Основы теории случайных процессов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1971. 536 с. (*Karlin S.* A first course in stochastic processes. — New York – London: Academic Press, 1968. 502 p.)
22. *Агаларов Я. М.* Признак унимодальности целочисленной функции одной переменной // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2019. Т. 26. Вып. 1. С. 65–66. EDN: EBHBDV.

Поступила в редакцию 26.07.24

OPTIMIZATION OF THE THRESHOLD PARAMETER OF A RED-LIKE QUEUE MANAGEMENT ALGORITHM FOR A $G/M/1$ QUEUE

Ya. M. Agalarov

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

Abstract: The article considers the problem of calculating the optimal threshold value of a RED-like algorithm by a threshold value for a $G/M/1$ queue with incomplete queue renovation and probabilistic clients reset. The RED-like algorithm uses a single-threshold mechanism for probabilistic reset of clients from the queue, according to which at each moment of release of the service device, some clients are removed from the queue with a given probability. Customers

queue in the order of arrival and those whose queue number exceeds the specified threshold at the time of release of the service device (they are in the “congestion zone”) are reset with a given probability. It is assumed that the “congestion zone” has a limited number of seats and if there are no empty seats in the “congestion zone” at the time of arrival of the customer, the customer is reset. The objective function is a weighted sum of the average customer delay time, the average number of customers dropped from the queue per unit of time, the average number of customers rejected at the entrance per unit of time, the average downtime of the device, and customer service payment. The mathematical problem of optimizing the objective function by a threshold value at a fixed size of the “overload zone” is formulated. The proofs of some relations between the characteristics of the queuing system and the unimodality of the objective function in terms of the threshold value are presented. A simple algorithm for the guaranteed solution of the formulated problem is proposed.

Keywords: queue management; queue renovation; threshold parameter

DOI: 10.14357/08696527240403

EDN: VLYKTK

References

1. Floyd, S., and V. Jacobson. 1993. Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE ACM T. Network*. 1:397–413. doi: 10.1109/90.251892.
2. Viana, C. C. H., I. S. Zaryadov, and T. A. Milovanova. 2020. Queueing systems with different types of renovation mechanism and thresholds as the mathematical models of active queue management mechanism. *Discrete Continuous Models Applied Computational Science* 28(4):305–318. doi: 10.22363/2658-4670-2020-28-4-305-318.
3. Kabra, M., S. Saha, and B. Lin. 2006. Fast buffer memory with deterministic packet departures. *14th Symposium on High-Performance Interconnects Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 67–72. doi: 10.1109/HOTI.2006.13.
4. Zheng, B., and M. Atiquzzaman. 2008. A framework to determine the optimal weight parameter of RED in next-generation Internet routers. *Int. J. Commun. Syst.* 21:987–1008.
5. Reddy, T. B., A. Ahammed, and R. Banu. 2009. Performance comparison of active queue management techniques. *Int. J. Computer Science Network Security* 9(2):405–408.
6. Lin, D., and R. Morris. 1997. Dynamics of random early detection. *Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication Proceedings*. New York, NY: ACM. 127–137. doi: 10.1145/263109.26315.
7. Feng, W.-C., K. G. Shin, D. D. Kandlur, and D. Saha. 2002. The BLUE active queue management algorithms. *IEEE ACM T. Network*. 10(4):513–528. doi: 10.1109/TNET.2002.801399.
8. Feng, W.-C., D. D. Kandlur, D. Saha, and K. G. Shin. 2001. Stochastic Fair Blue: A queue management algorithm for enforcing fairness. *20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 3:1520–1529. doi: 10.1109/INFCOM.2001.916648.

9. Parris, M., K. Jeffay, and F. D. Smith. 1999. Lightweight active router-queue management for multimedia networking. *Proc. SPIE* 3654:162–174. doi: 10.1117/12.333807.
10. Pan, R., B. Prabhakar, and K. Psounis. 2000. CHOKe: A stateless active queue management scheme for approximating fair bandwidth allocation. *19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 2:942–951.
11. Korolkova, A. V., D. S. Kulyabov, and A. I. Tchernoiivanov. 2009. K voprosu o klasifikatsii algoritmov RED [On the classification of RED algorithms]. *Vestnik RUDN. Ser. Matematika. Informatika. Fizika* [Bulletin of Russian Peoples' Friendship University. Series Mathematics, Information Sciences and Physics] 3:34–46. EDN: KXIRXN.
12. Zaryadov, I. S., A. V. Korolkova, and R. V. Razumchik. 2012. Matematicheskie modeli rascheta i analiza kharakteristik sistem aktivnogo upravleniya ocheredyami s dvumya vkhodyashchimi potokami i razlichnymi prioritetami [Mathematical models of active queue management systems analysis based on queueing system with two types of traffic and different priorities]. *T-Comm* 6(7):107–111. EDN: PWXFSB.
13. Gaidamaka, Yu. V., and A. G. Maslennikov. 2013. Ob odnoy sisteme massovogo obsluzhivaniya s aktivnym upravleniem ochered'yuy [On a queueing system with an active queue management]. *Vestnik RUDN. Ser. Matematika. Informatika. Fizika* [Bulletin of Russian Peoples' Friendship University. Series Mathematics, Information Sciences and Physics] 4:56–64. EDN: RCKTSD.
14. Konovalov, M., and R. Razumchik. 2017. Queueing systems with renovation vs. queues with RED. Cornell University. arXiv.org. 10 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/1709.01477/> (accessed October 16, 2024).
15. Konovalov, M., and R. Razumchik. 2018. Comparison of two active queue management schemes through the $M/D/1/N$ queue. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 12(4):9–15. doi: 10.14357/19922264180402. EDN: VOGJOZ.
16. Konovalov, M. G., and R. V. Razumchik. 2018. Numerical analysis of improved access restriction algorithms in a $GI/G/1/N$ system. *J. Commun. Technol. El.* 63(6):616–625. doi: 10.1134/S1064226918060141.
17. Lie, A., O. M. Aamo, and L. A. Rønningen. 2004. Optimization of active queue management based on proportional control system. *Conference (International) on Communications, Internet, and Information Technology Proceedings*. St. Thomas, U.S. Virgin Islands: IASTED/ACTA Press. 6 p.
18. Baldi, S., E. B. Kosmatopoulos, A. Pitsillides, M. Lestas, P. A. Ioannou, and Y. Wan. 2016. Adaptive optimization for active queue management supporting TCP flows. *P. Amer. Contr. Conf.* Piscataway, NJ: IEEE. 751–756. doi: 10.1109/ACC.2016.7525004.
19. Agalarov, Ya. M. 2023. Ob optimizatsii raboty rezervnogo pribora v mnogolineynoy sisteme massovogo obsluzhivaniya [Optimization of a queue-length dependent additional server in the multiserver queue]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(1):89–95. doi: 10.14357/19922264230112. EDN: FCYDUT.
20. Agalarov, Ya. M. 2024. Ob odnoporogovom upravlenii ochered'yuy v sisteme massovogo obsluzhivaniya s neterpelivymi zayavkami [On single-threshold queue management in

- a queuing system with impatient customers]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18(2):40–46. doi: 10.14357/19922264240206. EDN: JZHAKU.
21. Karlin, S. 1968. *A first course in stochastic processes*. New York–London: Academic Press. 502 p.
22. Agalarov, Ya. M. 2019. Priznak unimodal'nosti tselochislennoy funktsii odnoy perezmennoy [A sign of unimodality of an integer function of one variable]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Surveys Applied and Industrial Mathematics] 26(1):65–66. EDN: EBHBDB.

Received July 26, 2024

Contributor

Agalarov Yaver M. (b. 1952) — Candidate of Science (PhD) in technology, associate professor, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; agglar@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СВЕРТОЧНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕСУРСНЫХ СИСТЕМ С ВРЕМЕНЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ, ЗАВИСЯЩИМ ОТ ОБЪЕМА ТРЕБОВАНИЙ*

А. И. Назарьин¹, Э. С. Сопин², С. Я. Шоргин³

Аннотация: Ресурсные системы массового обслуживания с ограниченным ресурсом (РеСМО) используются для анализа и расчета показателей эффективности систем беспроводной связи. Рассматривается многолинейная РеСМО с ограниченным ресурсом и с временем обслуживания, зависящим от объема требований заявки, которая позволяет проводить анализ эффективности беспроводных сетей в условиях передачи эластичного трафика. Расчет вероятностных характеристик модели осложняется необходимостью вычисления многократных сверток распределения требований к ресурсам. Для снижения сложности расчетов предложен сверточный алгоритм, позволяющий получать вероятностные характеристики, такие как вероятность потери заявки и средний объем занятого ресурса, в процессе вычисления нормировочной константы. Проведен численный анализ вероятности потери заявки и среднего объема занятого ресурса для дискретных распределений требований к ресурсу.

Ключевые слова: ресурсная система массового обслуживания; случайный объем требований; вероятность потери заявки

DOI: 10.14357/08696527240404

EDN: VSZCBK

1 Введение

Ресурсные системы массового обслуживания широко применяются для моделирования систем беспроводных сетей связи [1–3], которые позволяют учитывать неоднородность требований пользовательских сессий к частотно-временному ресурсу базовой станции, вызванной изменчивым состоянием радиоканала и мобильностью пользователей. Одна из ключевых особенностей ресурсных моделей в применении к анализу систем беспроводной связи заключается в ограничении доступного ресурса [4, 5], однако и системы с бесконечным объемом ресурса находят свое применение [6].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10128, <https://rscf.ru/project/22-79-10128/>.

¹Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, nazaryin_ai@rudn.ru

²Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, sopin-es@rudn.ru

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, sshorgin@ipiran.ru

При построении математических моделей функционирования мобильных сетей пятого и последующих поколений, как правило, исследователи акцентируют внимание на особенностях передачи трафика сверхнадежной связи с малыми задержками (URLLC, Ultra-Reliable Low Latency Communications) или широкополосного доступа с фиксированной скоростью [7, 8]. Тем не менее эластичный трафик все еще составляет существенную долю трафика мобильных сетей, поэтому оценка показателей эффективности его передачи представляется важной задачей [9]. В большинстве исследованных ранее РеСМО предполагалось, что время обслуживания не зависит от объема требований заявок к ресурсу [10, 11], что отражает особенности обслуживания неэластичного трафика. Однако для учета особенностей передачи эластичного трафика в беспроводной сети необходимо рассматривать РеСМО с временем обслуживания и объемом требований к ресурсу, задаваемыми совместной функцией распределения. В работе [12] рассматривается РеСМО с временем обслуживания, зависящим от объема требуемых ресурсов, которая может применяться для анализа показателей эффективности сети мобильной связи в условиях передачи эластичного трафика. При этом ресурс базовой станции выделяется сессиям передачи данных дискретными ресурсными блоками, что вынуждает уделять особое внимание РеСМО с дискретными требованиями к ресурсу [13].

Несмотря на наличие аналитических формул для вероятностных характеристик РеСМО, полученных в [12], прямые расчеты по ним осложняются необходимостью вычисления многократных сверток распределения требований заявок к ресурсам. В работе [14] представлен рекуррентный алгоритм для подсчета стационарных вероятностей и характеристик ресурсной системы с временем обслуживания, не зависящим от объема требований, позволяющий существенно снизить вычислительную сложность. В данной работе представлено развитие данного алгоритма на случай, когда время обслуживания зависит от объема требований. Выведены формулы для расчета вероятности потери заявки и среднего объема занятого ресурса.

2 Описание модели

Рассмотрим РеСМО с N приборами и объемом ресурса $R < \infty$ единиц. Заявки поступают в систему согласно пуассоновскому потоку с параметром λ . Поступающая в систему i -заявка требует для обслуживания один прибор и r_i единиц ресурса в соответствии с дискретным распределением $p_j = P\{r_i = j\}$, $j = \overline{1, R}$. Обозначим за $H_j(x)$ условную функцию распределения времени обслуживания заявки при занятии j единиц ресурса.

Пусть в некоторый момент времени t в системе находятся n заявок, которые суммарно занимают r единиц ресурса, $r \leq R$, а вновь поступающая i -заявка требует $r_i \geq 0$ единиц ресурса. Тогда если в системе нет свободных приборов ($n = N$) или недостаточно свободных единиц ресурса ($R - r < r_i$),

то заявка не может быть обслужена и покидает систему. В противном случае заявка принимается в систему и занимает требуемый ей объем ресурса на все время обслуживания. По окончании обслуживания заявка покидает систему и освобождает занятое ею число единиц ресурса. При этом процессы поступления заявок не влияют на число выделяемых ресурсов.

Поведение системы описывается случайным процессом

$$X(t) = \{\xi(t), \gamma_1(t), \gamma_2(t), \dots, \gamma_{\xi(t)}(t) : 0 \leq n \leq N, 0 \leq r \leq R\},$$

где $\xi(t)$ — число заявок в момент времени t ; $\gamma_i(t)$ — число занятых единиц ресурса i -заявкой. Пространство состояний процесса имеет вид:

$$S = \{(n, r_1, r_2, \dots, r_n) : 0 \leq n \leq N, 0 \leq r_1 + r_2 + \dots + r_n \leq R, r_i \geq 1\}.$$

Обозначим за

$$b_j = \int_0^R x d(H_j(x))$$

условное среднее время обслуживания заявки при условии, что она занимает j единиц ресурса. Тогда среднее время обслуживания заявок b будет иметь вид:

$$b = \sum_{i=0}^R b_i p_i.$$

Согласно [12], стационарное распределение процесса $X(t)$ в случае дискретного распределения требований к ресурсам можно найти по формулам:

$$q_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = 0\} = \left(1 + \sum_{k=1}^N \frac{\rho^k}{k!} \sum_{i=0}^R g_r^{(k)}\right)^{-1}; \quad (1)$$

$$q_k(r) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = k, \gamma_1(t) + \gamma_2(t) + \dots + \gamma_k(t) = r\} = q_0 g_r^{(k)} \frac{\rho^k}{k!},$$

$$1 \leq k \leq N, 1 \leq r \leq R, \quad (2)$$

где $g_i = (1/b)b_i p_i$; $\{g_r^{(k)}\}$, $r \geq 1$, — k -кратная свертка распределения $\{g_r\}$; $\rho = \lambda b$ — предложенная нагрузка. Вероятность потери заявки может быть записана в виде:

$$\pi = 1 - q_0 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\rho^k}{k!} \sum_{r=0}^R g_r^{(k+1)}, \quad (3)$$

а среднее требование к ресурсу —

$$B = q_0 \sum_{k=1}^N \frac{\rho^k}{k!} \sum_{r=1}^R r g_r^{(k)}. \quad (4)$$

3 Сверточный алгоритм

Из вида формул (1)–(4) становится ясно, что вычисления стационарного распределения и вероятностных характеристик осложняются, так же как и для РеСМО с временем обслуживания, не зависящим от объема занятого ресурса, необходимостью вычисления многократных сверток распределения $\{g_r\}$, $r \geq 1$.

Введем функции $G(n, r)$, имеющие следующий вид:

$$G(n, r) = \sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} \sum_{j=0}^r g_j^{(k)}. \quad (5)$$

По определению, $G(N, R) = q_0^{-1}$, т.е. представляет собой нормировочную константу.

Утверждение 1. *Функции $G(n, r)$ могут быть вычислены согласно рекуррентному соотношению*

$$G(n, r) = G(n-1, r) + \frac{\rho}{n} \sum_{j=0}^r g_j (G(n-1, r-j) - G(n-2, r-j)),$$

$$2 \leq n \leq N,$$

с начальными условиями

$$G(0, r) = 1, \quad 0 \leq r \leq R;$$

$$G(1, r) = 1 + \rho \sum_{j=0}^r g_j, \quad 0 \leq r \leq R.$$

Доказательство.

Начальные условия выводятся из определения функций $G(n, r)$ (5). Для вывода рекуррентного соотношения рассмотрим разность

$$G(n, r) - G(n-1, r) = \sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} \sum_{i=0}^r g_i^{(k)} - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\rho^k}{k!} \sum_{i=0}^r g_i^{(k)} = \frac{\rho^n}{n!} \sum_{j=0}^r g_j^{(n)}.$$

Далее разложим $g_j^{(n)}$ по формуле свертки и проведем преобразования с изменением порядка суммирования:

$$\begin{aligned} \frac{\rho^n}{n!} \sum_{j=0}^r g_j^{(n)} &= \frac{\rho^n}{n!} \sum_{j=0}^r \sum_{i=0}^j g_j g_{j-i}^{(n-1)} = \frac{\rho^n}{n!} \sum_{i=0}^r g_i \sum_{j=i}^r g_{j-i}^{(n-1)} = \\ &= \frac{\rho}{n} \sum_{i=0}^r g_i \left(\frac{\rho^{n-1}}{(n-1)!} \sum_{i=0}^{r-i} g_{j-i}^{(n-1)} \right). \end{aligned}$$

Нетрудно заметить, что выражение в скобках представляет собой тоже разность $G(n-1, r-i) - G(n-2, r-i)$. Таким образом, получаем

$$G(n, r) - G(n-1, r) = \frac{\rho}{n} \sum_{i=0}^r g_i (G(n-1, r-i) - G(n-2, r-i)),$$

что доказывает утверждение. $\square$

Одно из главных преимуществ предложенного метода расчета нормировочной константы заключается в возможности использования промежуточных расчетов нормировочной константы для вычисления вероятности потери и среднего объема занятого ресурса напрямую без расчета стационарного распределения (2). Эти результаты сформулированы в следующих утверждениях.

Утверждение 2. Вероятность потери заявки π может быть получена по формуле

$$\pi = 1 - \frac{1}{G(N, R)} \sum_{i=0}^r g_j G(N-1, R-i).$$

Доказательство. Переписывая формулу (3) в терминах функций $G(n, r)$ и применяя формулу свертки, а также стандартные преобразования с изменениями порядка суммирования, получим

$$\begin{aligned} \pi &= 1 - q_o \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\rho^k}{k!} \sum_{r=0}^R g_r^{(k+1)} = 1 - \frac{1}{G(N, R)} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\rho^k}{k!} \sum_{r=0}^R g_r^{(k+1)} = \\ &= 1 - \frac{1}{G(N, R)} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\rho^k}{k!} \sum_{r=0}^R \sum_{i=0}^r g_i g_{r-i}^{(k)} = 1 - \frac{1}{G(N, R)} \sum_{i=0}^R g_i \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\rho^k}{k!} \sum_{r=0}^{R-i} g_r^{(k)}. \end{aligned}$$

Нетрудно заметить, что внутренние суммы могут быть записаны в терминах функций $G(n, r)$. Таким образом,

$$\pi = 1 - \frac{1}{G(N, R)} \sum_{i=0}^R g_i G(N-1, R-i). \quad \square$$

Утверждение 3. Среднее число занятого ресурса B можно записать при помощи функций $G(n, r)$ в виде

$$B = R - \frac{1}{G(N, R)} \sum_{i=1}^R G(N, R - i).$$

Доказательство. По определению, средний объем занятого ресурса можно записать как разность общего объема ресурса и среднего числа незанятых единиц ресурса $\bar{B}$. Запишем $\bar{B}$ согласно формуле (4) и применим стандартные правила преобразования сумм:

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \sum_{r=0}^R (R - r) q_0 \sum_{k=0}^N \frac{\rho^k}{k!} g_r^{(k)} = \frac{1}{G(N, R)} \sum_{k=0}^N \frac{\rho^k}{k!} \sum_{r=0}^R (R - r) g_r^{(k)} = \\ &= \frac{1}{G(N, R)} \sum_{k=0}^N \frac{\rho^k}{k!} \sum_{r=0}^R \sum_{i=1}^{R-r} g_r^{(k)} = \frac{1}{G(N, R)} \sum_{i=1}^R \sum_{k=0}^N \frac{\rho^k}{k!} \sum_{r=0}^{R-i} g_r^{(k)}. \end{aligned}$$

Записывая внутренние суммы последнего выражения в терминах функций $G(n, r)$, получим окончательное выражение для среднего объема занятого ресурса B :

$$B = R - G^{-1}(N, R) \sum_{i=1}^R G(N, R - i). \quad \square$$

Таким образом, утверждения 1–3 образуют сверточный алгоритм вычисления вероятности потери заявки и среднего объема занятого ресурса в РеСМО с временами обслуживания, зависящими от требований к ресурсу. Для вычисления вероятностных характеристик достаточно двух последних строк функций $G(n, r)$ при $n = N - 1$ и N .

4 Численный пример

В рамках численного примера рассматривается РеСМО с $N = 100$ приборами и $R = 100$ единицами ресурса. Будем считать, что время обслуживания имеет распределение Эрланга $\Gamma(k, \theta_j)$ с плотностью

$$h_j(x) = \frac{x^{k-1} \theta_j^k}{(k-1)!} e^{-\theta_j x}, \quad x \geq 0,$$

где параметр k зафиксирован и равен 2, а θ_j — параметр, зависящий от объема требований. В рамках численного примера предположим, что $\theta_j = j/R$, $j = \overline{1, R}$,

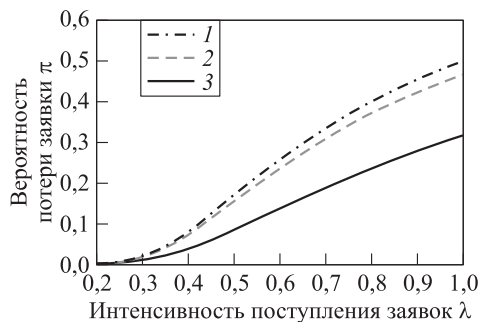


Рис. 1 Вероятность потери заявки в зависимости от интенсивности поступления заявок: 1 — биномиальное распределение; 2 — пуассоновское распределение; 3 — геометрическое распределение

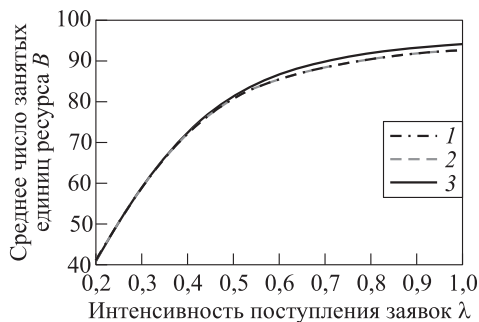


Рис. 2 Средний объем занятого ресурса в зависимости от интенсивности поступления заявок: 1 — биномиальное распределение; 2 — пуассоновское распределение; 3 — геометрическое распределение

т. е. чем больше единиц ресурса занято, тем меньше среднее время обслуживания. Это в целом соответствует принципам передачи эластичного трафика.

Будем рассматривать три типа распределений требований к ресурсу: биномиальное, пуассоновское и геометрическое. В связи с тем что в большинстве технических систем заявки обязательно занимают некоторый минимальный объем, используются смещенные распределения с условием $p_0 = 0$, при этом в случае пуассоновского и геометрического распределений применяется еще и усечение, чтобы $p_i = 0$, $i > R$.

Параметры распределений были выбраны таким образом, чтобы математические ожидания m совпадали и были равны 6, а дисперсии σ^2 различались. Так, для биномиального распределения $\sigma^2 = 2,5$, для пуассоновского — $\sigma^2 = 5$, а для геометрического — $\sigma^2 = 30$.

На рис. 1 представлен график вероятности потери заявки для рассмотренных распределений в зависимости от интенсивности поступлений λ . График показывает, что большая дисперсия распределения требований к ресурсу приводит к снижению вероятности потери. Наблюдаемый эффект связан с тем, что в подобных системах теряются преимущественно наиболее «тяжелые» (с точки зрения требований к ресурсу) заявки. Соответственно, при увеличении дисперсии распределения уменьшается средний объем потерянных заявок и увеличивается средний объем принятых, что позволяет принять на обслуживание большее число заявок.

По этим же причинам возникает различие и в среднем объеме занятого ресурса, представленном на рис. 2. Так как большая дисперсия приводит к увеличению среднего объема принятых заявок, то они будут более требовательными к ресурсу, но займут меньше времени на обслуживание. Однако следует заметить, что здесь различия между разными распределениями не настолько существенные.

5 Заключение

В данной работе рассматривалась РеСМО с дискретным распределением требований к ресурсу и временем обслуживания, зависящим от объема требований. Для вычисления вероятностных характеристик системы был разработан сверточный алгоритм, позволяющий избежать вычислений многократных сверток распределения требований при расчете нормировочной константы, а затем использовать промежуточные результаты для вычисления вероятностных характеристик. Был приведен численный пример для трех дискретных распределений требований к ресурсам.

Литература

1. Бесчастный В. А., Острикова Д. Ю., Гайдамака Ю. В. Анализ производительности систем «новое радио» сети 5G с помощью системы массового обслуживания с переменными требованиями к ресурсу // Системы и средства информатики, 2019. Т. 29. № 4. С. 73–83. doi: 10.14357/08696527190407. EDN: BDLAIF.
2. Бесчастный В. А., Острикова Д. Ю., Шоргин В. С., Молчанов Д. А., Гайдамака Ю. В. Анализ непрерывности пользовательской сессии в беспроводных системах терагерцового диапазона // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 4. С. 144–156. doi: 10.14357/08696527210412. EDN: WXUQJJ.
3. Moltchanov D., Sopin E., Begishev V., Samuylov A., Koucheryavy Y., Samouylov K. A tutorial on mathematical modeling of 5G/6G millimeter wave and terahertz cellular systems // IEEE Commun. Surv. Tut., 2022. Vol. 24. Iss. 2. P. 1072–1116. doi: 10.1109/COMST.2022.3156207.
4. Наумов В. А., Самуйлов К. Е., Самуйлов А. К. О суммарном объеме ресурсов, занимаемых обслуживаемыми заявками // Автоматика и телемеханика, 2016. № 8. С. 125–135. EDN: WWVXCT.
5. Tikhonenko O., Ziolkowski M. Queueing systems with random volume customers and their performance characteristics // J. Information Organizational Sciences, 2021. Vol. 45. Iss. 1. P. 21–38. doi: 10.31341/jios.45.1.2.
6. Pankratova E., Moiseeva S., Farhadov M. Infinite-server resource queueing systems with different types of Markov-modulated poisson process and renewal arrivals // Mathematics, 2022. Vol. 10. Iss. 16. Art. 2962. 16 p. doi: 10.3390/math10162962.
7. Кочеткова И. А., Куцазли А. И., Харин П. А., Шоргин С. Я. Модель для анализа приоритетного доступа трафика URLLC при прерывании обслуживания и снижении скорости передачи сессий eMBB в сети 5G // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 3. С. 123–134. doi: 10.14357/08696527210311. EDN: UYLDMI.
8. Румянцева А. С., Москалева Ф. А., Самуйлов А. К., Шоргин С. Я., Гайдамака Ю. В. О моделировании совместного обслуживания одноадресного и многоадресного трафика с приоритизацией // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 2. С. 40–54. doi: 10.14357/08696527240203. EDN: QXWAUL.
9. Кочеткова И. А., Власкина А. С., Эсенг Манге П. Л. Э., Шоргин В. С. Задача разделения ресурса беспроводной сети по задержке передачи эластичного трафика // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 1. С. 23–32. doi: 10.14357/08696527240102. EDN: WXYRQV.

10. Begishev V., Sopin E., Moltchanov D., Kovalchukov R., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Joint use of guard capacity and multiconnectivity for improved session continuity in millimeter-wave 5G NR systems // IEEE T. Veh. Technol., 2021. Vol. 70. Iss. 3. P. 2657–2672. doi: 10.1109/TVT.2021.3061906.
11. Daraseliya A., Sopin E., Moltchanov D., Koucheryavy Y., Samouylov K. Performance of offloading strategies in collocated deployments of millimeter wave NR-U technology // IEEE T. Veh. Technol., 2023. Vol. 72. Iss. 2. P. 2535–2549. doi: 10.1109/TVT.2022.3213927.
12. Наумов В. А., Самуйлов К. Е. О связи ресурсных систем массового обслуживания с сетями Эрланга // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 9–14. doi: 10.14357/19922264160302. EDN: WMJXQH.
13. Sopin E., Samouylov K., Vikhrova O., Kovalchukov R., Moltchanov D., Samuylov A. Evaluating a case of downlink uplink decoupling using queuing system with random requirements // Internet of things, smart spaces, and next generation networks and systems / Eds. O. Galinina, S. Balandin, Y. Koucheryavy. — Lecture notes in computer science ser. — Cham: Springer, 2016. Vol. 9870. P. 440–450. doi: 10.1007/978-3-319-46301-8.37.
14. Sopin E., Ageev K., Markova E., Vikhrova O., Gaidamaka Yu. Performance analysis of M2M traffic in LTE network using queuing systems with random resource requirements // Autom. Control Comp. S., 2018. Vol. 52 Iss. 5. P. 345–353. doi: 10.3103/S0146411618050127. EDN: AZMION.

Поступила в редакцию 01.09.24

DEVELOPMENT OF A CONVOLUTIONAL ALGORITHM FOR CALCULATING THE STATIONARY CHARACTERISTICS OF RESOURCE LOSS SYSTEMS WITH REQUIREMENTS-DEPENDING SERVING TIME

A. I. Nazarin¹, E. S. Sopin^{1,2}, and S. Ya. Shorgin²

¹Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation

²Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences; 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: Resource loss systems (ReLS) are often used to analyze and calculate the performance metrics of wireless communication systems. The authors consider a multiserver ReLS with discrete requirements and service times that depend on the volume required resources, which allows one to analyze the efficiency of elastic traffic transmission in wireless networks. The evaluation of probabilistic characteristics for the model is complicated by the need to perform multiple convolutions of resource requirement distributions. To reduce the complexity of the calculations, the paper proposes a convolutional algorithm that allows one to obtain probabilistic measures, such as the loss probability and the average volume of occupied resources, during the calculation of normalization constant.

The numerical analysis of the loss probability and the average volume of occupied resources for discrete distributions of resource requirements is carried out.

Keywords: resource loss system; random requirements; loss probability

DOI: 10.14357/08696527240404

EDN: VSZCBK

Acknowledgments

The research was funded by the Russian Science Foundation, project No. 22-79-10128, <https://rscf.ru/en/project/22-79-10128/>.

References

1. Beschastnyi, V. A., D. Yu. Ostrikova, and Yu. V. Gaidamaka. 2019. Analiz proizvodi-tel'nosti sistem "novoe radio" seti 5G s pomoshch'yu sistemy massovogo obsluzhivaniya s peremennymi trebovaniyami k resursu [5G New Radio base station performance analysis using limited resource loss system with variable demands]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 29(4):73–83. doi: 10.14357/08696527190407. EDN: BDLAIF.
2. Beschastnyi, V. A., D. Yu. Ostrikova, V. S. Shorgin, D. A. Moltchanov, and Yu. V. Gaidamaka. 2021. Analiz nepreryvnosti pol'zovatel'skoy sessii v besprovodnykh sistemakh teragertseвого diapazona [Uninterrupted connectivity time performance analysis in terahertz systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(4):144–156. doi: 10.14357/08696527210412. EDN: WXUQJJ.
3. Moltchanov, D., E. Sopin, V. Begishev, A. Samuylov, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov. 2022. A tutorial on mathematical modeling of 5G/6G millimeter wave and terahertz cellular systems. *IEEE Commun. Surv. Tut.* 24(2):1072–1116. doi: 10.1109/COMST.2022.3156207.
4. Naumov, V., K. Samuilov, and A. Samuilov. 2016. On the total amount of resources occupied by serviced customers. *Automat. Rem. Contr.* 77(8):1419–1427. doi: 10.1134/S0005117916080087. EDN: WVUOFR.
5. Tikhonenko, O., and M. Ziolkowski. 2021. Queueing systems with random volume customers and their performance characteristics. *J. Information Organizational Sciences* 45(1):21–38. doi: 10.31341/jios.45.1.2.
6. Pankratova, E., S. Moiseeva, and M. Farhadov. 2022. Infinite-server resource queueing systems with different types of Markov-modulated Poisson process and renewal arrivals. *Mathematics* 10(16):2962. 16 p. doi: 10.3390/math10162962.
7. Kochetkova, I. A., A. I. Kushchazli, P. A. Kharin, and S. Ya. Shorgin. 2021. Model' dlya analiza prioritetnogo dostupa trafika URLLC pri preryvanii obsluzhivaniya i snizhenii skorosti peredachi sessiy eMBB v seti 5G [Model for analyzing priority URLLC transmission with eMBB bit rate degradation and interruptions in 5G networks]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(3):123–134. doi: 10.14357/08696527210311. EDN: UYLDMI.
8. Rumyantseva, A. S., F. A. Moskaleva, A. K. Samuilov, S. Ya. Shorgin, and Yu. V. Gaidamaka. 2024. O modelirovanii sovmestnogo obsluzhivaniya odnodresnogo i mnogodresnogo trafika s prioritizatsiey [On modeling shared service of unicast and multicast traffic with prioritization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Sys-*

- tems and Means of Informatics 34(2):40–54. doi: 10.14357/08696527240203. EDN: QXWAUL.
9. Kochetkova, I. A., A. S. Vlaskina, P. L. E. Eseng Mangue, and V. S. Shorgin. 2024. Zadacha razdeleniya resursa besprovodnoy seti po zaderzhke peredachi elastichnogo trafika [Radio resource allocation for elastic traffic transmission with latency fairness in networks]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(1):23–32. doi: 10.14357/08696527240102. EDN: WXPQV.
 10. Begishev, V., E. Sopin, D. Moltchanov, R. Kovalchukov, A. Samuylov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov. 2021. Joint use of guard capacity and multiconnectivity for improved session continuity in millimeter-wave 5G NR systems. *IEEE T. Veh. Technol.* 70(3): 2657–2672. doi: 10.1109/TVT.2021.3061906.
 11. Daraseliya, A., E. Sopin, D. Moltchanov, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov. 2023. Performance of offloading strategies in collocated deployments of millimeter wave NR-u technology. *IEEE T. Veh. Technol.* 72(2):2535–2549. doi: 10.1109/TVT.2022.3213927.
 12. Naumov, V. A., and K. E. Samouylov. 2016. O svyazi resursnykh sistem massovogo obsluzhivaniya s setyami Erlanga [On relationship between queuing systems with resources and Erlang networks]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(3):9–14. doi: 10.14357/19922264160302. EDN: WMJXQH.
 13. Sopin, E., K. Samouylov, O. Vikhrova, R. Kovalchukov, D. Moltchanov, and A. Samuylov. 2016. Evaluating a case of downlink uplink decoupling using queuing system with random requirements. *Internet of things, smart spaces, and next generation networks and systems*. Eds. O. Galinina, S. Balandin, and Y. Koucheryavy. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer. 9870:440–450. doi: 10.1007/978-3-319-46301-8_37.
 14. Sopin, E., K. Ageev, E. Markova, O. Vikhrova, and Yu. Gaidamaka. 2018. Performance analysis of M2M traffic in LTE network using queuing systems with random resource requirements. *Autom. Control Comp. S.* 52(5):345–353. doi: 10.3103/S0146411618050127. EDN: AZMION.

Received September 1, 2024

Contributors

Nazarin Artem I. (b. 2000) — Master student, Department of Probability Theory and Cyber Security, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; nazaryin.ai@rudn.ru

Sopin Eduard S. (b. 1987) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Department of Probability Theory and Cyber Security, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sopin-es@rudn.ru

Shorgin Sergey Ya. (b. 1952) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; sshorgin@ipiran.ru

КООПЕРАТИВНЫЕ САМОНАСТРАИВАЮЩИЕСЯ ГИБРИДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В МЕДИЦИНЕ: КОНЦЕПЦИЯ, ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ, ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПРОБЛЕМЫ*

С. Б. Румовская¹, Ф. Н. Парамзин²

Аннотация: Клиническая картина полиморбидных, полиэтиологических заболеваний (в том числе острого панкреатита (ОП)) разнообразна, непредсказуема и может пересекаться со множеством других заболеваний. Это изменяет и усложняет процесс персонализированной оценки (диагностической и прогностической) состояния сложного объекта в медицине (организма пациента), что влечет серьезные ошибки и риски. Необходимы технологии виртуализации принятия решений. В работе предложены кооперативные самонастраивающиеся гибридные интеллектуальные системы (КСГиИС) (на примере ОП), а также рассмотрены результаты редукции проблемы персонализированной оценки состояния пациента и спецификации задач из полученной декомпозиции.

Ключевые слова: гибридные интеллектуальные системы поддержки принятия решений; проблемно-инструментальная методология; консилиум; оценка тяжести и прогнозирование состояния пациента

DOI: 10.14357/08696527240405

EDN: YLQTQU

1 Введение

Медицина и здравоохранение функционируют в условиях разнообразия мира и любого объекта, неопределенности границ объектов, полицентризма и перехода к сотрудничеству, дополнительности и относительности знаний [1], что повышает нагрузку на врачей. Ввиду этого актуально исследование проблемы выработки решений при персонализированной оценке тяжести и прогнозировании состояния сложного объекта (ПОТ ПС СО) в медицине с целью повышения эффективности и качества полного раннего описания тяжести, течения заболевания и его исходов. Также ввиду тенденции к разработке интеллектуальных систем (ИС) для медицины и здравоохранения в виде гибридной ИС (ГиИС) [2], в том числе при

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00392.

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, sophiyabr@gmail.com

²Центральная городская клиническая больница; Балтийский федеральный университет им. И. Канта, fedia931@yandex.ru

поддержке государства в планировании и финансировании подобных исследований и разработок [1, 3], актуальна разработка КСГиИС для ПОТ ПС СО на примере ОП, характеризующегося сложной клинической картиной, фазовостью течения и высокой вероятностью развития тяжелых осложнений, что приводит [4–6] к летальности при тяжелом ОП — до 70% и выше, а также к ошибкам в оценке состояния при поступлении — до 26%–30%, в стационаре — до 10%. В основе лежат идеи, описанные в работе [7]. В [8] представлены результаты исследования проблемной среды ПОТ ПС СО на примере ОП. В настоящей работе предложена разработка КСГиИС на базе проблемно-инструментальной (ПИ) методологии [9] разработки ГиИС и модели крупнозернистой функциональной ГиИС [10] (при необходимости можно дополнить до мелкозернистой модели [9]), а также рассмотрены результаты редукции проблемы и спецификации задач из ее декомпозиции.

2 Концепция и методология разработки

Персонализированная (индивидуализированная) медицина базируется на индивидуальных особенностях пациента, строя индивидуальные прогнозы больного, а не болезни. Кооперативная самонастраивающаяся ГиИС (рис. 1) «Виртуальные консилиумы персонализированной оценки тяжести и прогнозирования состояния пациентов» (ВК ПОТ ПСП) на примере ОП будут интегрировать разнородные модели выработки индивидуальных решений на всех этапах процесса ведения пациента при комплексной, полиаспектной персонализированной оценке состояния с интерпретацией результатов в условиях существенного разнообразия, неоднородности и неопределенности информации как о самом объекте, так и о процессе ПОТ ПС СО. Рекомендации КСГиИС впоследствии помогут врачу определиться с правильной терапией, причем метод ранней объективизации тяжести заболевания и определение направления его течения — выработка коллективных сотрудничающих решений функциональной гетерогенной моделью ГиИС на разных фазах заболевания с учетом разнородных знаний о его этиологии и патогенезе — формируется ситуативно в зависимости от проявляющейся симптоматики и для каждого пациента (отношения интеграции в функциональной ГиИС на рис. 1 опущены). Модели специалистов виртуального консилиума дополняют решения друг друга и сотрудничают, обмениваясь частными решениями.

Модель лица, принимающего решения (ЛПР), получая частные решения, интегрирует их, преодолевая при необходимости противоречие и вынося решение о тяжести состояния с подробным описанием ситуации и обоснованием результатов. Если интеграция невозможна, модель ЛПР запускает реконфигурацию системы (самонастройка структуры системы). Проблема прогнозирования исходов заболевания также решается ЛПР, поэтому модель ЛПР расширена трансформационной ГиИС — модульная ANFIS (adaptive network fuzzy inference system) и прецедентная экспертная система (ЭС) также включены в гетерогенное модельное поле (ГМП). Модульная ANFIS позволит обеспечить формализацию размы-

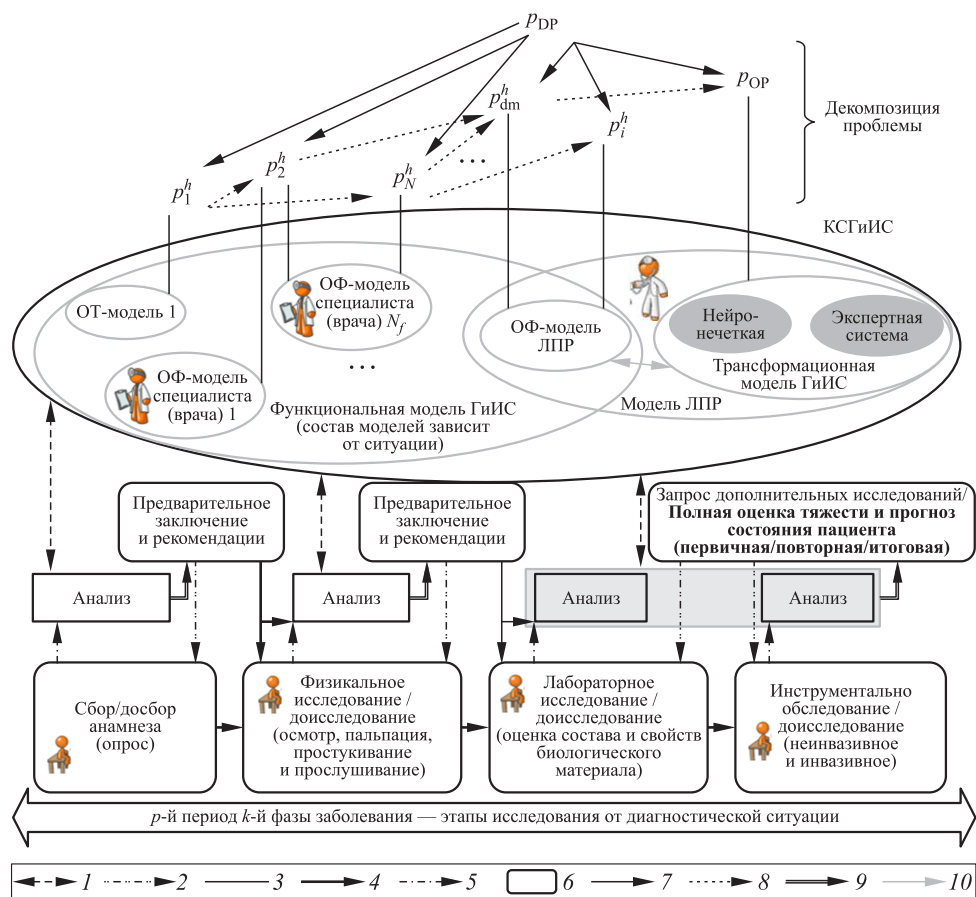


Рис. 1 Общая схема моделей КСГиИС, их место в процессе персонализированной оценки состояния сложного объекта в медицине и соответствие моделей гетерогенного модельного поля элементам из декомпозиции: p_{DP} — проблема ПОТ ПС СО в медицине; $\{p_1^h, \dots, p_i^h, \dots, p_{dm}^h, p_N^h\}$ — множество элементов (задач) из декомпозиции проблемы, включающей подпроблему p_{OP} прогнозирования исходов заболевания; ОТ- и ОФ-модель — модель технологической и функциональной задачи соответственно; 1 — инициализация и запуск консилиума; 2 — запрос на уточнение входной информации; 3 — соответствие элемента из декомпозиции и модели консилиума; 4 — передача всей полученной на предыдущих этапах входной и выходной информации; 5 — передача входной информации; 6 — интерфейсы ввода/вывода информации с возможностью ее корректировки; 7 — отношения включения; 8 — отношения декомпозиции; 9 — передача выходной информации на интерфейс; 10 — отношение взаимодействия (интеграции) моделей ГиИС

тых понятий и связей (нечеткость в рассуждениях врачей), вырабатывая прогноз, интерпретируемый ЭС с базой знаний и базой прецедентов, пополняемой по результатам работы ANFIS, обрабатывающей типовые ситуации. Возможен режим «ЭС-ANFIS» для получения прогноза ЭС и/или для обучения ANFIS. Модели из ГМП ВК ПОТ ПСП смогут работать автономно. Разработка ВК ПОТ ПС как КСГиИС на примере ОП включает следующие этапы (с возможностью возврата на предыдущие этапы для уточнения/корректировки информации/моделей):

(1) системный анализ проблемы ПОТ ПС СО:

- (1.1) «идентификация проблемы» ПОТ ПС СО, характеризующейся гетерогенностью, разнообразием большого числа факторов, неоднозначностью оценки ситуации, ошибками в выборе приоритетов и противоречивостью требований — основные результаты данного этапа представлены в [8];
- (1.2) «редукция проблемы». Результат — декомпозиция, включающая как функциональные задачи, составляющие функциональные структуры проблем, так и технологические задачи, решаемые для эффективной организации обработки данных и знаний в ходе процесса ведения пациента;
- (1.3) «спецификация задач». Результат — концептуальные модели;
- (1.4) «выбор методов решения задач» из декомпозиции проблемы ПОТ ПС СО — устанавливается соответствие «задача–класс метода формализованного представления систем (МФПС)», учитывающее качественные характеристики методов. Здесь может быть выявлена альтернативность (функциональная избыточность) инструментариев решения задач, когда одной или нескольким задачам из декомпозиции проблемы ПОТ ПС СО ставится в соответствие более одного класса МФПС. Если выявлена задача («белое пятно»), которой не был поставлен в соответствие класс МФПС, то реализуют этап 2.1i, иначе этап 2.1;

(2) этапы синтеза и тестирования методов и моделей ВК ПОТ ПСП:

- (2.1i) запуск цикла мелкозернистой гибридизации [9] для всех «белых пятен» с целью отображения инструментальной структуры проблемы посредством конструирования из набора инструментальных средств (зерен) метода-потомка (гибрида внутри гибрида), лишенного родительских недостатков;
- (2.1) «разработка моделей автоматизированного решения задач из декомпозиции проблемы» ПОТ ПС СО, включаемых в ГМП. Если на этапе 1.4 выявлена функциональная избыточность, то для каждой соответствующей модели специфицируются области релевантности — множества

- значений параметров внешней среды (время осмотра, регламент ПОТ ПС СО и т. д.);
- (2.2) «разработка эвристического алгоритма синтеза и реконфигурации метода» автоматизированной ПОТ ПС СО в медицине. Результат работы алгоритма — множество троек «модель задачи, модель задачи, межмодельный интерфейс» для последующей инициализации на этапе 2.3 виртуального консилиума. Список троек формируется в зависимости от ситуации, сложившейся при выработке коллективного решения в системе (запроса от модели ЛПР на реконфигурацию системы), а также от этапа ведения пациента, фазы течения заболевания и проявившихся симптомов и реакций;
- (2.3) «разработка функциональной структуры» КСГиИС на примере ОП, «синтез интегрированного метода» и машинные эксперименты.

3 Декомпозиция проблемы и спецификация задач

В настоящей работе применяется метод редукции как адаптация для проблем типа ПОТ ПС СО метода редукции диагностической проблемы вширь и вглубь, основанного на знаниях, из [11] (этапы рассмотрены далее). Общая схема декомпозиции представлена на рис. 2.

Этап 1. Фазовая редукция. Множество альтернативных задач разных фаз управления (объектом диагностики) связано с проблемой отношениями «часть–целое». В медицине в качестве однородных превалируют задачи учета и контроля $\{p_{u1}, \dots, p_{un1}, p_{k1}, \dots, p_{kn2}\}$ (см. рис. 2).

Этап 2. Запускается редукция по стратам — редукция вширь по профессиональным образам $p_{sp1}, \dots, p_{spn}, p_{dm}$, включающим и образ ЛПР p_{dm} . При необходимости выделяется задача предобработки информации $p_{preprocteh}$, посту-

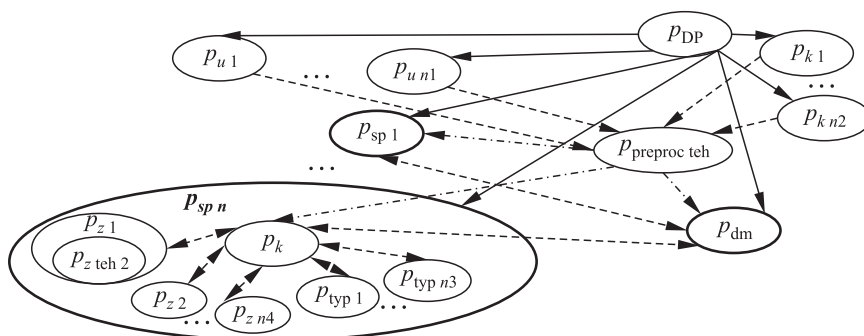


Рис. 2 Общая схема редукции проблем оценки состояния объекта в медицине

пившей в результате решения задач, выделенных на этапе фазовой редукции (например, распределение информации по $p_{sp1}, \dots, p_{spn}, p_{dm}$).

Этап 3. Выделенные профессиональные образы после запуска метода редукции по информационно-управляющим отношениям связываются в структуру «метаобработка», в которой p_{dm} становится координирующей задачей (координирует вызов, перераспределение ресурсов и т. д.), так как ЛПР интегрирует все поступившие к нему частные заключения и формирует итоговое. На этом этапе $p_{sp1}, \dots, p_{spn}, p_{dm}$ могут быть редуцированы по информационно-управляющим отношениям (редукция вглубь). Здесь могут быть выделены задачи разного типа (при необходимости на множестве задач задается порядок их решения), как, например, для p_{spn} на рис. 2: задачи «крупные» p_z и связанные с ними «мелкие» $p_{z\text{teh}}$ и скомпенсированные затруднения $p_{\text{тип}}$ (часто встречающиеся, с типовым решением). Возможно сочетание разных вариантов структур: (1) «метаобработка» — на рис. 2 для p_{spn} ; (2) «цепочка» (с обратной связью и без); (3) «подчиненная обработка», устанавливающая отношения включения одной задачи в другую — первая выступает как вспомогательная для второй (например, на рис. 2 — p_{z1} и $p_{z\text{teh}2}$). При необходимости после этапа 3 запускается редукция задач в граф И/ИЛИ или КОМБ (на рис. 2 не приведена).

Декомпозиция проблемы ПОТ ПС СО как результат ее редукции представлена на рис. 3 — базируется на клинических рекомендациях, инструкциях и методических указаниях по ОП [4, 12–15], а также на результатах извлечения знаний специалистов (врачей). Чтобы не перегружать рис. 3, опущены задачи учета симптоматической информации и сама проблема ПОТ ПС СО. По результатам бесед с врачами принято решение в рамках настоящего исследования не детализировать профессиональные образы пульмонолога, кардиолога, невролога и нефролога. Определим схему концептуальных моделей z -й задачи в терминах концептуальных моделей [9, 10] и языка исчисления предикатов первого порядка как

$$\begin{aligned}
 p_z^h = & R^{\text{st}}(p_{0z}^h, \text{Goal}_z^h) \wedge R^{\text{pr}}(p_{0z}^h, \text{Data}_z^h) \wedge R^{\text{met}}(p_{0z}^h, \text{MET}_z^h) \wedge \\
 & \wedge R^{\text{pr}}(p_{0z}^h, \text{phase}) \wedge R^{\text{pr}}(p_{0z}^h, \text{cvar}) \wedge R^{\text{pr}}(p_{0z}^h, \text{ct}) \wedge R^{\text{inc}}(p_{\text{DP}}, p_{0z}^h) \wedge \\
 & \wedge R^{\text{dec}}(P^h, P^h) \wedge R^{\text{pr}}(p_{0z}^h, S_z^h) \\
 & \forall z, z \in \{\text{ConfAP}, \text{FASS}, \text{Etio}, \text{ResSF}, \text{CarSF}, \text{CNSF}, \text{ExcSF}, \text{GIF}, \\
 & \text{DECom}, \text{DLCom}, \text{IntASS}, \text{DevMOF}, \text{tehMOF}, \text{DetELN}, \text{PO}, \text{tehPO}, \\
 & \text{IntP}, \text{Fin}\},
 \end{aligned}$$

где p_{0z}^h — « z -я однородная задача»; Goal_z^h и Data_z^h — цель и входные данные z -й задачи соответственно; $\wedge$ — одновременная выполнимость атомарных формул; MET_z^h — метод, модель, алгоритм и программа z -й задачи; phase , cvar и ct — фаза задачи, класс переменных и класс задачи соответственно; p_{DP} — схема



Рис. 3 Декомпозиция проблемы персонализированной оценки состояния сложного объекта в медицине: 1 — информационно-управляющие отношения; 2 — технологическая задача построения входного множества информативных признаков; 3 — информационно-управляющие отношения на множествах технологических и функциональных задач; 4 — профессиональные образы проблемы

концептуальных моделей проблемы ПОТ ПС СО в медицине; R^{inc} и R^{dec} — отношения включения и декомпозиции соответственно; S_z^h — спецификатор, включающий идентификатор задачи и свойства однородной проблемной среды — в соответствии с моделью (3) из [8] определяют страту S_k (параметрическая, потоковая или ситуационная) решения z -й задачи и требуемый для ее решения профессиональный язык L . Страта S_k будет определено после выбора методов решения задач из декомпозиции (см. разд. 2, этап 1.4).

Задачи врача приемного отделения (l — хирургия/гастроэнтерология):

- (1) p_{ConfAP}^h : $\text{Goal}_{\text{ConfAP}}^h$ — подтвердить ОП; фазы учета, контроля и анализа; $R_{\text{ConfAP}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{ConfAP}}^h, p_{\text{FAS}}^h), (p_{\text{ConfAP}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{ConfAP}}^h)\}$; лингвистические переменные, ст-диагностика;
- (2) p_{FAS}^h : $\text{Goal}_{\text{FAS}}^h$ — первичная оценка тяжести; фазы учета, контроля и анализа; $R_{\text{FAS}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{ConfAP}}^h, p_{\text{FAS}}^h), (p_{\text{FAS}}^h, p_{\text{Etio}}^h)\}$; лингвистические переменные, ст-диагностика.

Задачи выявления полиорганной недостаточности (ПОН):

- (1) p_{ResSF}^h : $\text{Goal}_{\text{ResSF}}^h$ — выявление недостаточности дыхательной системы; фазы учета, контроля и анализа; лингвистические нечеткие переменные, ст-диагностика; L — пульмонология; $R_{\text{ResSF}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{ResSF}}^h, p_{\text{IntAss}}^h), (p_{\text{ResSF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{ResSF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{ResSF}}^h)\}$;
- (2) p_{CarSF}^h : $\text{Goal}_{\text{CarSF}}^h$ — выявление недостаточности сердечно-сосудистой системы (ССС); фазы учета, контроля и анализа; лингвистические нечеткие переменные, ст-диагностика; L — кардиология; $R_{\text{CarSF}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{CarSF}}^h, p_{\text{IntAss}}^h), (p_{\text{CarSF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{CarSF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{CarSF}}^h)\}$;
- (3) p_{CNSF}^h : $\text{Goal}_{\text{CNSF}}^h$ — выявление недостаточности центральной нервной системы (ЦНС); фазы учета, контроля и анализа; лингвистические нечеткие переменные, ст-диагностика; L — неврология; $R_{\text{CNSF}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{CNSF}}^h, p_{\text{IntAss}}^h), (p_{\text{CNSF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{CNSF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{CNSF}}^h)\}$;
- (4) p_{ExcSF}^h : $\text{Goal}_{\text{ExcSF}}^h$ — выявление недостаточности выделительной системы (ВС); фазы учета, контроля и анализа; лингвистические нечеткие переменные, ст-диагностика; L — нефрология; $R_{\text{ExcSF}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{ExcSF}}^h, p_{\text{IntAss}}^h), (p_{\text{ExcSF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{ExcSF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{ExcSF}}^h)\}$;
- (5) p_{GIF}^h : $\text{Goal}_{\text{GIF}}^h$ — выявление недостаточности желудочно-кишечного тракта (ЖКТ); фазы учета, контроля и анализа; лингвистические нечеткие переменные, ст-диагностика; L — хирургия/гастроэнтерология; $R_{\text{GIF}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{GIF}}^h, p_{\text{IntAss}}^h), (p_{\text{GIF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{GIF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{GIF}}^h)\}$.

Задачи лечащего хирурга (L — хирургия):

- (1) p_{Etio}^h : $\text{Goal}_{\text{Etio}}^h$ — определить этиологию ОП; фазы учета и анализа; лингвистические нечеткие переменные, ст-диагностика; $R_{\text{Etio}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{FAss}}^h, p_{\text{Etio}}^h), (p_{\text{Etio}}^h, p_{\text{IntAss}}^h)\}$;
- (2) p_{DECom}^h : $\text{Goal}_{\text{DECom}}^h$ — выявление ранних осложнений; фазы учета, контроля и анализа; лингвистические нечеткие переменные, ст-диагностика; $R_{\text{DECom}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{DECom}}^h, p_{\text{IntAss}}^h)\}$;
- (3) p_{DLCom}^h : $\text{Goal}_{\text{DLCom}}^h$ — выявление поздних осложнений; фазы учета, контроля и анализа; лингвистические нечеткие переменные, ст-диагностика; $R_{\text{DLCom}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{ResSF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{CarSF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{CNSF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{ExcSF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{GIF}}^h, p_{\text{DLCom}}^h), (p_{\text{DECom}}^h, p_{\text{IntAss}}^h)\}$;
- (4) p_{IntAss}^h : $\text{Goal}_{\text{IntAss}}^h$ — определить степень тяжести (вторично, на основе расширенной симптоматической информации); фазы учета, контроля и анализа; лингвистические переменные, ст-диагностика; $R_{\text{IntAss}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{Etio}}^h, p_{\text{IntAss}}^h), (p_{\text{ResSF}}^h, p_{\text{IntAss}}^h), (p_{\text{CarSF}}^h, p_{\text{IntAss}}^h), (p_{\text{CNSF}}^h, p_{\text{IntAss}}^h),$

$$(p_{\text{ExcSF}}^h, p_{\text{IntASS}}^h), (p_{\text{GIF}}^h, p_{\text{IntASS}}^h), (p_{\text{IntASS}}^h, p_{\text{DevMOF}}^h), (p_{\text{IntASS}}^h, p_{\text{Fin}}^h), \\ (p_{\text{DetELN}}^h, p_{\text{IntASS}}^h), (p_{\text{IntASS}}^h, p_{\text{DetELN}}^h)\} \cup R_{\text{DECom}}^{\text{dec}}.$$

Задачи гастроэнтеролога/хирурга (L — хирургия/гастроэнтерология):

- (1) p_{DevMOF}^h : $\text{Goal}_{\text{DevMOF}}^h$ — определить направление развития заболевания в отношении ПОН; фазы учета, контроля и анализа; лингвистические переменные, ст-диагностика; $R_{\text{DevMOF}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{IntASS}}^h, p_{\text{DevMOF}}^h), (p_{\text{DevMOF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{DevMOF}}^h), (p_{\text{tehMOF}}^h, p_{\text{DevMOF}}^h), (p_{\text{DevMOF}}^h, p_{\text{tehMOF}}^h), (p_{\text{DevMOF}}^h, p_{\text{PO}}^h)\}$;
- (2) p_{tehMOF}^h : $\text{Goal}_{\text{tehMOF}}^h$ — оптимизация набора показателей для определения направления развития заболевания относительно ПОН; фаза анализа, детерминированные переменные, ст-оптимизация; $R_{\text{tehMOF}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{tehMOF}}^h, p_{\text{DevMOF}}^h), (p_{\text{DevMOF}}^h, p_{\text{tehMOF}}^h)\}$.

Задачи ЛПР (L — хирургия):

- (1) p_{DetELN}^h : $\text{Goal}_{\text{DetELN}}^h$ — определить масштаб, характер и локацию некроза; фазы учета, контроля и анализа; лингвистические нечеткие переменные, ст-диагностика; $R_{\text{DetELN}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{DetELN}}^h, p_{\text{IntASS}}^h), (p_{\text{IntASS}}^h, p_{\text{DetELN}}^h), (p_{\text{DetELN}}^h, p_{\text{PO}}^h), (p_{\text{DetELN}}^h, p_{\text{Fin}}^h)\}$;
- (2) p_{PO}^h : $\text{Goal}_{\text{PO}}^h$ — прогноз исходов ОП (панкреатическая инфекция и летальный исход); фазы учета, контроля и анализа; детерминированные переменные, ст-прогнозирование; $R_{\text{PO}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{DetELN}}^h, p_{\text{PO}}^h), (p_{\text{DevMOF}}^h, p_{\text{PO}}^h), (p_{\text{PO}}^h, p_{\text{IntP}}^h), (p_{\text{IntP}}^h, p_{\text{PO}}^h), (p_{\text{PO}}^h, p_{\text{tehPO}}^h), (p_{\text{tehPO}}^h, p_{\text{PO}}^h)\}$;
- (3) p_{tehPO}^h : $\text{Goal}_{\text{tehPO}}^h$ — оптимизация набора показателей для прогнозирования исходов ОП; фаза анализа, детерминированные переменные, ст-оптимизация; $R_{\text{tehPO}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{PO}}^h, p_{\text{tehPO}}^h), (p_{\text{tehPO}}^h, p_{\text{PO}}^h), (p_{\text{IntP}}^h, p_{\text{tehPO}}^h), (p_{\text{tehPO}}^h, p_{\text{IntP}}^h)\}$;
- (4) p_{IntP}^h : $\text{Goal}_{\text{IntP}}^h$ — формирование объяснения полученного прогноза или (при необходимости) прогноз исходов ОП (панкреатическая инфекция и летальный исход); фазы учета, контроля и анализа; лингвистические переменные, ст-диагностика; $R_{\text{IntP}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{IntP}}^h, p_{\text{PO}}^h), (p_{\text{PO}}^h, p_{\text{IntP}}^h), (p_{\text{IntP}}^h, p_{\text{tehPO}}^h), (p_{\text{tehPO}}^h, p_{\text{IntP}}^h), (p_{\text{IntP}}^h, p_{\text{Fin}}^h)\}$;
- (5) p_{Fin}^h : $\text{Goal}_{\text{Fin}}^h$ — формирование персонализированной интегральной комплексной оценки состояния пациента и итогового заключения; фазы учета, контроля и анализа; лингвистические переменные, ст-диагностика; $R_{\text{Fin}}^{\text{dec}} = \{(p_{\text{ConfAP}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{ConfAP}}^h), (p_{\text{ResSF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{ResSF}}^h), (p_{\text{CarSF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{CarSF}}^h), (p_{\text{CNSF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{CNSF}}^h), (p_{\text{ExcSF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{ExcSF}}^h), (p_{\text{GIF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{GIF}}^h), (p_{\text{DevMOF}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{Fin}}^h, p_{\text{DevMOF}}^h), (p_{\text{IntASS}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{DetELN}}^h, p_{\text{Fin}}^h), (p_{\text{IntP}}^h, p_{\text{Fin}}^h)\}$.

4 Заключение

В настоящей работе описан подход к разработке КСГиИС для поддержки принятия решений в медицине, а также декомпозиция проблемы ПОТ ПС СО в систему взаимосвязанных задач. Следующий этап — исследование функциональной и инструментальной неоднородности проблемы ПОТ ПС СО. Разработка методов и моделей предложенных КСГиИС — цель исследования, выполняемого за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00392. Подобные системы обеспечат своевременное выявление и прогнозирование тяжелых состояний и осложнений, а также повысят качество прогноза и, как следствие, лечения. При этом у данного исследования есть перспективы дальнейшего развития в смысле расширения КСГиИС для решения также и проблемы противодействия выявленным аномалиям (патологиям) [16] в организме пациента, т. е. назначения лечения с целью достижения определенного эффекта от терапии.

Литература

1. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: Указ Президента РФ от 10 октября 2019 г. № 490. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72738946/>.
2. Румовская С. Б. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в медицине: понятие, проблемы, подходы к разработке // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 2. С. 107–122. doi: 10.14357/08696527240208. EDN: IJDVVV.
3. Борисов А. В., Босов А. В., Жуков Д. В. Стратегия исследований и разработок в области искусственного интеллекта I: Основные понятия и краткая хронология // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 1. С. 57–68. doi: 10.14357/08696527210105. EDN: IJJDSO.
4. Клинические рекомендации. Острый панкреатит. http://disuria.ru/_ld/9/999_kr20K85mz.pdf.
5. Масляков В. В., Брызгунов А. В. Оптимизация диагностики острого панкреатита с использованием трансрезонансного функционального топографа // Лечащий врач, 2016. № 8. С. 33–36. EDN: WMOCIV.
6. Ревивили А. Ш., Федоров А. В., Сажин В. П., Оловянный В. Е. Состояние экстренной хирургической помощи в Российской Федерации // Хирургия. Ж. им. Н. И. Пирогова, 2019. № 3. С. 88–97. doi: 10.17116/hirurgia201903188. EDN: NSOJGO.
7. Румовская С. Б., Кириков И. А. Моделирование выработки полного раннего дифференциального диагноза и прогноза состояния сложных объектов в медицине. Проблемы и перспективы // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 3. С. 26–35. doi: 10.14357/08696527220303. EDN: FWJRWB.
8. Rumovskaya S., Paramzin F. Virtual training simulator and medical decision support for personalized assessment of severity and prediction of the patients' state (the case of acute pancreatitis): Investigation of the problem area and identification

- of the problem // 4th Conference (International) on Technology Enhanced Learning in Higher Education Proceedings. — IEEE, 2024. P. 100–105. doi: 10.1109/TELE62556.2024.10605702.
9. *Кириков И. А., Колесников А. В., Листопад С. В., Румовская С. Б.* Мелкозернистые гибридные интеллектуальные системы. Часть 2: Двухнаправленная гибридизация // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 1. С. 96–105. doi: 10.14357/19922264160109. EDN: VXDWPF.
 10. *Колесников А. В., Кириков И. А.* Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. — М.: ИПИ РАН, 2007. 387 с.
 11. *Румовская С. Б.* Редукция диагностической проблемы с когнитивной визуализацией ее элементов // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Мат-лы V Всеросс. Пospelовской конф. с междунар. участием / Под ред. А. В. Колесникова. — Калининград: БФУ им. И. Канта, 2020. С. 242–251. EDN: ICLHGG.
 12. *Banks P. A., Bollen T. L., Dervenis C., et al.* Acute pancreatitis classification working group. Classification of acute pancreatitis-2012: Revision of the Atlanta classification and definitions by international consensus // Gut, 2013. Vol. 62. No. 1. P. 102–111. doi: 10.1136/gutjnl-2012-302779.
 13. *Топчиев М. А., Кчибеков Э. А., Паршин Д. С. и др.* Острый панкреатит: комплексная диагностика, прогнозирование осложнений и лечение. — Астрахань: АГМУ, 2017. 120 с. EDN: WTCHRT.
 14. *Грекова Н. М., Бордуновский В. Н., Наймушина Ю. В., Бухвалов А. Г.* Острый панкреатит. — Челябинск: Уралполисервис, 2019. 96 с. EDN: AYYFDU.
 15. *Попандопуло К. И., Авакимян В. А., Авакимян С. В. и др.* Острые и хронические заболевания поджелудочной железы. — Краснодар: КубГМУ Минздрава России, 2020. 105 с. EDN: VEWCSV.
 16. *Забейайло М. И., Грушо А. А., Грушо Н. А., Тимонина Е. Е.* Поддержка решения задач диагностического типа // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 1. С. 69–81. doi: 10.14357/08696527210106. EDN: DMYQIG.

Поступила в редакцию 29.08.24

COOPERATIVE SELF-CONFIGURING HYBRID INTELLIGENT SYSTEMS FOR PERSONALIZED DIAGNOSTICS AND PROGNOSIS IN MEDICINE: CONCEPTUAL IDEA, DEVELOPMENT APPROACH, AND PROBLEM DECOMPOSITION

S. B. Rumovskaya¹ and F. N. Paramzin^{2,3}

¹Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

²Central City Clinical Hospital, 3-5 Letnyaya Str., Kaliningrad 236005, Russian Federation

³Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation

Abstract: The clinical picture of polymorbid, polyetiological diseases (including acute pancreatitis) is diverse, unpredictable, and can intersect with many other diseases. This changes and complicates the process of personalized assessment (diagnostic and prognostic) of the state of a complex object in medicine (a patient) which entails serious errors and risks. It is necessary to support decision-making in medicine by artificial intelligence systems. The paper proposes cooperative self-configuring hybrid intelligent systems (using acute pancreatitis as an example) and also considers the results of reducing the problem of personalized assessment of the patient's condition and specification of tasks from the resulting decomposition.

Keywords: hybrid intelligent decision support systems; problem-instrumental methodology; council; assessment of the severity and prognosis of the patient's condition

DOI: 10.14357/08696527240405

EDN: YLQTQU

Acknowledgments

The reported study was funded by the Russian Science Foundation according to the research project No. 24-21-00392.

References

1. O razvitii iskusstvennogo intellekta v Rossiyskoy Federatsii: Ukaz Prezidenta ot 10 oktyabrya 2019 g. No. 490 [About strategy of scientific and technological development of the Russian Federation. Presidential Decree No. 490 dated 10.10.2019]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72738946/> (accessed October 14, 2024).
2. Rumovskaya, S. B. 2024. Intellektual'nye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v meditsine: ponyatie, problemy, podkhody k razrabotke [Intelligent decision support systems in medicine: Concept, problems, and approaches to the development]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(2):107–122. doi: 10.14357/08696527240208. EDN: IJDVVV.

3. Borisov, A. V., A. V. Bosov, and D. V. Zhukov. 2021. Strategiya issledovaniy i razrabotok v oblasti iskusstvennogo intellekta I: Osnovnye ponyatiya i kratkaya khronologiya [Research and development strategy in the field of artificial intelligence I: Basic concepts and brief chronology]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(1):57–68. doi: 10.14357/08696527210105. EDN: IJJDSO.
4. Klinicheskiye rekomendatsii. Ostryy pankreatit [Clinical guidelines. Acute pancreatitis]. Available at: http://disuria.ru_id/9/999_kr20K85mz.pdf (accessed October 14, 2024).
5. Maslyakov, V. V. and A. V. Bryzgunov. 2016. Optimizatsiya diagnostiki ostrogo pankreatita s ispol'zovaniem transrezonansnogo funktsional'nogo topografa [Optimization of diagnosis of acute pancreatitis using transresonant functional topographer]. *Lechashchiy vrach* [Treating Physician] 8:33–36. EDN: WMOCIV.
6. Revishvili, A. Sh., A. V. Fedorov, V. P. Sazhin, and V. E. Olovnyanni. 2019. Sostoyanie ekstreynoy khirurgicheskoy pomoshchi v Rossiyskoy Federatsii [Emergency surgery in Russian Federation]. *Khirurgiya. Zhurnal im. N. I. Pirogova* [Pirogov Russ. J. of Surgery] 3:88–97. doi: 10.17116/hirurgia201903188. EDN: NSOJGO.
7. Rumovskaya, S. B., and I. A. Kirikov. 2022. Modelirovanie vyrabotki polnogo rannego differentsial'nogo diagnoza i prognoza sostoyaniya slozhnykh ob"ektov v meditsine. Problemy i perspektivy [Modeling of the development of a complete early differential diagnosis and prognosis of the state of complex objects in medicine. Problems and prospects]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(3):26–35. doi: 10.14357/08696527220303. EDN: FWJRWB.
8. Rumovskaya, S., and F. Paramzin. 2024. Virtual training simulator and medical decision support for personalized assessment of severity and prediction of the patients' state (the case of acute pancreatitis): Investigation of the problem area and identification of the problem. *4th Conference (International) on Technology Enhanced Learning in Higher Education Proceedings*. IEEE. 100–105. doi: 10.1109/!TELE62556.2024.10605702.
9. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, S. V. Listopad, and S. B. Rumovskaya. 2016. Melkozernistye gibridnye intellektua'nye sistemy. Chast' 2: Dvunapravlenennaya gibridizatsiya [Fine-grained hybrid intelligent systems. Part 2: Bidirectional hybridization]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(1):96–105. doi: 10.14357/19922264160109. EDN: VXDWPF.
10. 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.
11. Rumovskaya, S. B. 2020. Reduktsiya diagnosticheskoy problemy s kognitivnoy vizualizatsiei ee elementov [Reduction of a diagnostic problem with cognitive visualization of its elements]. *Hybrid and Synergetic Intelligent Systems: 5th All-Russian Pospelovsky Conference with International Participation Proceedings*. Ed. A. V. Kolesnikov. Kaliningrad: Publishing House of Immanuel Kant Baltic Federal University. 242–251. EDN: ICLHGG.
12. Banks, P. A., T. L. Bollen, C. Dervenis, *et al.* 2013. Acute pancreatitis classification working group. Classification of acute pancreatitis-2012: Revision of the Atlanta classification and definitions by international consensus. *Gut* 62(1):102–111. doi: 10.1136/gutjnl-2012-302779.

13. Topchiyev, M. A., E. A. Kchibekov, D. S. Parshin, *et al.* 2017. *Ostryy pankreatit: kompleksnaya diagnostika, prognozirovaniye oslozhneniy i lechenie* [Acute pancreatitis: Complex diagnosis, prediction of complications, and treatment]. Astrakhan: AGMU. 120 p. EDN: WTCHRT.
14. Grekova, N. M., V. N. Bordunovskiy, Yu. V. Naymushina, and A. G. Bukhvalov. 2019. *Ostryy pankreatit* [Acute pancreatitis]. Chelyabinsk: Uralpoliservis. 96 p. EDN: AYYFDU.
15. Popandopulo, K. I., V. A. Avakimyan, S. V. Avakimyan, *et al.* 2020. *Ostrye i khronicheskie zabolevaniya podzheludochnoy zhelezy* [Acute and chronic diseases of the pancreas]. Krasnodar: KubGMU Minzdrava Rossii. 105 p. EDN: VEWCSV.
16. Zabezhailo, M. I., A. A. Grusho, N. A. Grusho, and E. E. Timonina. 2021. Podderzhka resheniya zadach diagnosticheskogo tipa [Support for solving diagnostic type problems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(1):69–81. doi: 10.14357/08696527210106. EDN: DMYQIG.

Received August 29, 2024

Contributors

Rumovskaya Sophiya B. (b. 1985) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sophiyabr@gmail.com

Paramzin Fedor N. (b. 1993) — oncologist, Central City Clinical Hospital, 3-5 Letnyaya Str., Kaliningrad 236005, Russian Federation; PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation; fedia931@yandex.ru

РАЗВИТИЕ СТРУКТУРЫ НАДКОРПУСНЫХ БАЗ ДАННЫХ*

*А. А. Гончаров*¹

Аннотация: Описано развитие структуры надкорпусных баз данных (НБД), ориентированное на более глубокую детализацию результатов анализа параллельных текстов и большую системность в фиксировании этих результатов. Рассмотрена исходная структура той части НБД, которая относится к аннотированию переводных соответствий, после чего представлены четыре способа ее совершенствования. Эти способы обеспечивают следующие основные возможности: (1) снабжать блоки текста оригинала и перевода более подробной разметкой; (2) классифицировать признаки блока текста по нескольким основаниям; (3) сохранять сведения о лексических показателях признаков блока текста; (4) сохранять сведения о нерелевантности пар фрагментов параллельного текста поисковому запросу. Перечисленные возможности позволяют повысить качество результирующих данных с точки зрения их полноты и системности, а соответствующие изменения структуры данных — сделать ее более гибкой. Ни одно из предлагаемых изменений структуры данных не зависит от целей и задач какого-либо конкретного исследования, проводимого с использованием НБД.

Ключевые слова: надкорпусная база данных; параллельные тексты; аннотирование текстов; корпусная лингвистика

DOI: 10.14357/08696527240406

EDN: BCFENI

1 Введение

С 2012 г. в ФИЦ ИУ РАН разрабатываются базы данных, которые обеспечивают проведение исследований, предполагающих работу с параллельными текстами — прежде всего их аннотирование². В [1] этим базам данных было дано название **надкорпусных**. Согласно [2, 3], с точки зрения отношения к текстам параллельного корпуса в структуре НБД вычленимы две составляющих: (1) «корпусная» — предназначенная для хранения параллельных текстов, их мета-данных и морфологической разметки; (2) «надкорпусная» — предназначенная

*Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, a.gonch48@gmail.com

²Первым проектом, в рамках которого была начата разработка таких баз данных, стал проект по гранту РФФИ № 12-06-33038 «Контрастивные корпусные исследования русских и французских глагольных категорий в поливариантных параллельных текстах», выполнявшийся в 2012–2013 гг. (https://www.rfbr.ru/project_search/276215/).

для хранения всех тех данных, которые относятся к аннотированию переводных соответствий, обнаруженных в текстах.

Как показывает опыт использования НБД [4], структура корпусной составляющей НБД остается неизменной вне зависимости от проводимых исследований, а доступ к текстам осуществляется исключительно в режиме чтения. В качестве цели доступа к текстам выступает прежде всего поиск пар фрагментов параллельных текстов, содержащих какие-либо языковые единицы, причем искомые единицы необязательно должны быть словоформами: например, в [5] в качестве объекта поиска выступают пунктуационные знаки, а в [6] — имплицитные логико-семантические отношения. Что касается структуры надкорпусной составляющей НБД, то она может требовать доработки, чтобы обеспечить более широкие возможности аннотирования переводных соответствий (более того, иногда вместо использования этой составляющей для аннотирования создаются отдельные подсистемы с высокой степенью автономии [7–9]). Цель настоящей статьи — рассмотреть такие изменения структуры надкорпусной составляющей НБД, которые могут быть полезны вне зависимости от целей и задач конкретного исследования. В качестве отправной точки принимается структура, описанная в работах [2, 3].

2 Исходная структура надкорпусной составляющей надкорпусной базы данных

Прежде чем перейти к описанию изменений, рассмотрим исходную структуру надкорпусной составляющей НБД согласно [2, 3]. На рис. 1 приведен фрагмент логической схемы этой составляющей¹. На схеме в упрощенном виде представлены основные таблицы базы данных², в которых хранится все, что относится к аннотированию переводных соответствий. Промежуточные таблицы, обеспечивающие связи многие-ко-многим, не показаны. Кроме того, в схему включена таблица «Вхождение словоформы», которая содержит данные о связях словоформ и фрагментов исходных текстов (оригинала или перевода), а также о позиции каждого вхождения словоформы во фрагменте текста. В строгом смысле эта таблица относится к корпусной составляющей НБД, но, поскольку она обеспечивает связь между двумя составляющими, ее нельзя игнорировать даже в рамках рассмотрения надкорпусной составляющей.

С таблицей «Вхождение словоформы» связана таблица «Блок текста», которая относится к надкорпусной составляющей НБД. Под блоком текста понимается отрезок текста, необходимый и достаточный для анализа вхождения

¹Терминология, используемая в настоящей статье при описании структуры НБД и на рисунках, не всегда совпадает с той, что использовалась в работах [2, 3]. В случае расхождений в качестве отправной точки выступали работы [6, 10].

²На схемах базы данных используются сокращения: РК — первичный ключ (от *англ.* primary key); FK — внешний ключ (от *англ.* foreign key).

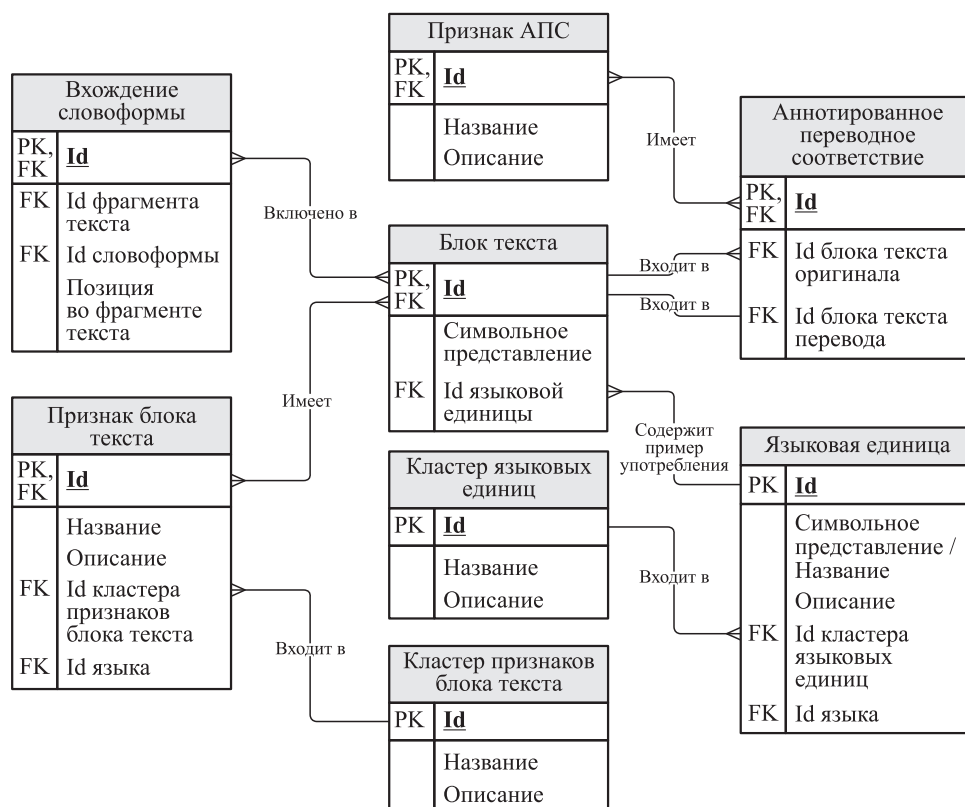


Рис. 1 Фрагмент логической схемы надкорпусной составляющей НБД

исследуемой языковой единицы, употребленной в составе этого отрезка (т.е., в сущности, блок текста представляет собой совокупность вхождения исследуемой языковой единицы и контекста этого вхождения). Благодаря тому что между таблицами «Вхождение словоформы» и «Блок текста» реализована связь многие-ко-многим, любое вхождение словоформы может использоваться в любом числе блоков текста, а добавляемая разметка остается четко отделенной от текстов.

Предполагается, что каждый блок текста формируется для некоторого — и только одного — вхождения исследуемой языковой единицы. По этой причине таблица «Блок текста» связана с таблицей «Языковая единица», содержащей перечень исследуемых языковых единиц. В свою очередь, языковые единицы на основании сходства по каким-либо критериям могут группироваться в кластеры, сведения о которых помещены в таблицу «Кластер языковых единиц».

Кроме того, блок текста может характеризоваться набором признаков, значимых для анализа вхождения языковой единицы. Такие признаки хранятся

в таблице «Признак блока текста». Как и языковые единицы, признаки блока текста объединяются в кластеры, перечень которых содержится в таблице «Кластер признаков блока текста».

Сведения о том, какие блоки текста оригинала и перевода соответствуют друг другу по смыслу, содержатся в таблице «Аннотированное переводное соответствие» (АПС). Из-за того что текст оригинала может иметь несколько переводов, один и тот же блок оригинала может быть связан с несколькими АПС, в то время как блок перевода — только с одним АПС. Каждое АПС может характеризоваться набором признаков, перечень которых хранится в таблице «Признак АПС».

3 Расширение возможностей разметки блоков текста

Как было отмечено в разд. 2, связь между таблицами «Вхождение словоформы» и «Блок текста» реализована при помощи промежуточной таблицы (на рис. 1 она не показана). Однако в ряде проектов (см., например, [11–13]) возникала необходимость сохранять данные о том, в каком качестве выступает то или иное вхождение словоформы в рамках заданного блока текста.

Предположим, исследуется значение русского глагола *хотеть* (пример 1).

Пример 1. Я не хочу смотреть этот фильм сегодня.

Если исходить из того, что все содержимое примера 1 входит в блок текста, а в качестве исследуемой языковой единицы выбран глагол *хотеть*, то при разметке этого блока текста желательно указать, какое именно вхождение аннотируется — назовем это «главным словом». В данном случае это была бы словоформа *хочу*. Кроме того, может понадобиться выделять слова, значимые для анализа функционирования этого вхождения — в примере 1 таким словом мог бы быть управляемый инфинитив *смотреть* — назовем это «функционально значимым словом». В примере 1' эти вхождения заключены в квадратные скобки.

Пример 1'. Я не [хочу]_{главн.} [смотреть]_{функц. знач.} этот фильм сегодня.

Чтобы сохранить такие сведения — назовем их сведениями о роли, которую вхождение словоформы играет в блоке текста, — в таблицу связей вхождений словоформ и блоков текста добавлялись столбцы, имеющие логический тип данных: «является главным словом», «является функционально значимым словом». Однако такая структура недостаточно гибка: добавление новой роли приводит к изменению структуры таблицы, а следовательно, к необходимости дорабатывать программное обеспечение.

Более того, может возникнуть потребность в многоуровневой разметке вхождений словоформ. Предположим, требуется провести аннотирование вопросно-ответных структур (пример 2).

Пример 2. — Ну почему ты меня не позвал? — Я думал, что ты в курсе. . .

В этом случае может потребоваться, с одной стороны, выделить главные (*почему*) и функционально значимые (частица *ну*) слова — в примере 2' заключены

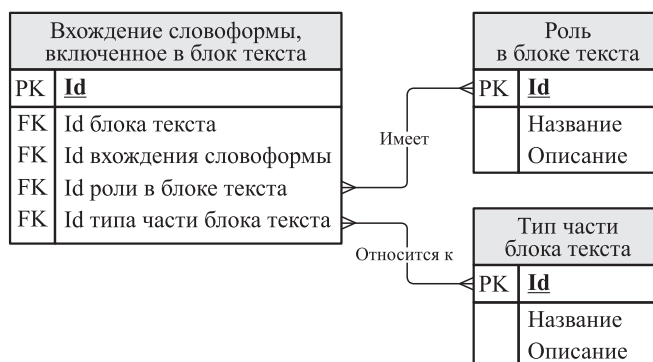


Рис. 2 Вариант реализации связи между таблицами «Вхождение словоформы» и «Блок текста»

в квадратные скобки, а с другой стороны, части блока текста, содержащие вопрос (*Ну почему ты меня не позвал*) и ответ (*Я думал, что ты в курсе*) — в примере 2' заключены в фигурные скобки.

Пример 2'. { — [Ну]_{функц. знач.} [почему]_{главн.} ты меня не позвал? }_{вопрос}
 { — Я думал, что ты в курсе... }_{ответ}

Поскольку теоретически как число ролей, так и число типов частей блока текста может быть любым (притом не обязательно известным в начале выполнения проекта), для обеспечения работы с этими объектами в структуру НБД могут быть добавлены две таблицы: «Роль в блоке текста» и «Тип части блока текста». На них будет ссылаться таблица, связывающая «Вхождение словоформы» и «Блок текста» (рис. 2).

Такая структура естественным образом накладывает ограничение: каждое вхождение словоформы может иметь только одну роль и входить только в одну часть блока текста. Это сделано намеренно по той причине, что без подобного ограничения аннотирование и графическое представление его результатов могло бы излишне усложниться, а размеченные данные, как следствие, стать существенно более «грязными».

4 Гибкость классификации признаков блока текста

В соответствии со схемой на рис. 1 каждый признак блока текста может входить только в один кластер признаков и привязан к одному языку. Первое обстоятельство накладывает излишне жесткие ограничения на структуру хранения данных: к примеру, оно не позволяет группировать признаки на разных основаниях. Второе обстоятельство затрудняет работу с несколькими языками, поскольку приводит к дублированию признаков (добавляются признаки, различающиеся только привязкой к языку) и усложняет последующий анализ данных

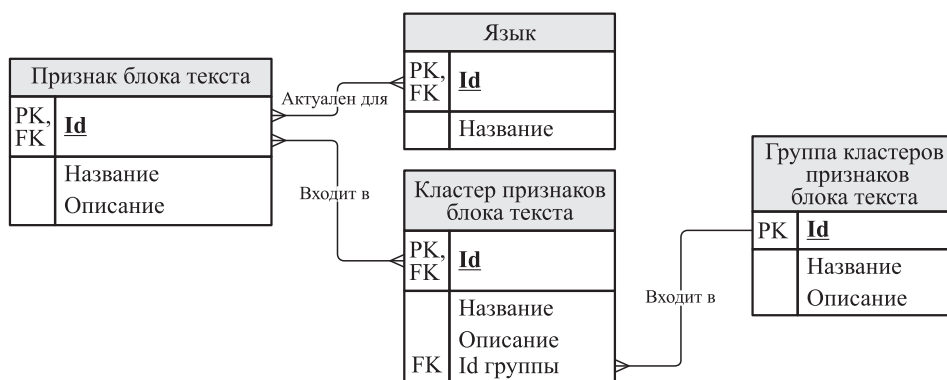


Рис. 3 Измененная структура хранения признаков блока текста

(проблематично получить количественные данные по заданному признаку для каждого языка).

Чтобы снять упомянутые ограничения и упростить работу с несколькими языками, схема хранения данных была изменена следующим образом (рис. 3). Во-первых, вместо связи один-ко-многим между признаками блока текста и кластерами этих признаков была реализована связь многие-ко-многим. Во-вторых, на случай если признаки окажутся настолько многочисленными и разнородными, что потребуются сгруппировать не только их, но и кластеры, куда они входят, была добавлена таблица «Группа кластеров признаков блока текста». В-третьих, связь между признаками блока текста и языками, для которых эти признаки актуальны, была также заменена на многие-ко-многим.

Совокупность этих решений обеспечивает гибкость работы с признаками блока текста, так как дает возможность классифицировать признаки по разным основаниям, использовать при классификации дополнительный уровень вложенности и с большим удобством работать с текстовыми данными на нескольких языках.

5 Указание на лексические показатели признаков блока текста

В ситуации, когда разметчик анализирует блок текста и принимает решение, что необходимо снабдить этот блок текста каким-либо признаком, это решение зачастую основывается на том, что в процессе анализа была обнаружена одна или несколько языковых единиц, которые указывают на этот признак. Так, если анализ употребления глагола *хотеть* должен учитывать наличие отрицания, то при анализе примера 1 разметчик примет решение присвоить блоку текста соответствующий признак. Очевидно, что это решение будет обусловлено наличием слова *не*. Однако структура надкорпусной составляющей НБД, приведенная на

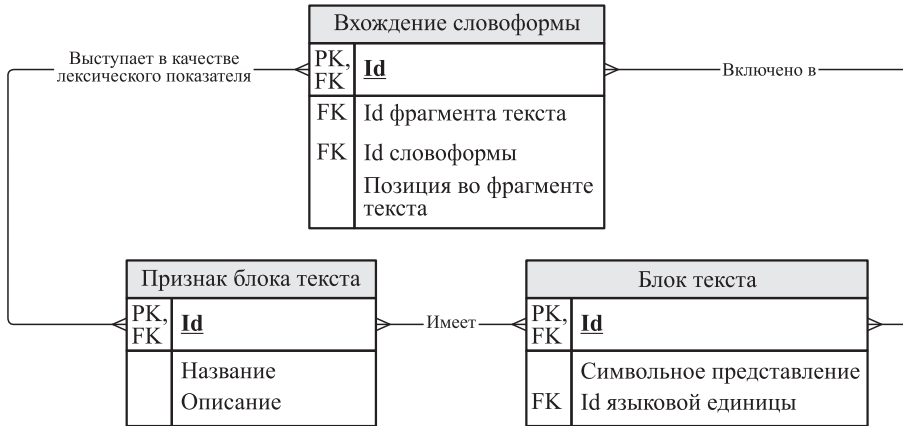


Рис. 4 Структура хранения данных о лексических показателях признаков блока текста

рис. 1, не позволяет сохранить эти сведения. По этой причине в обновленной версии структуры было решено предусмотреть подобную возможность, чтобы тем самым отразить сложные связи вхождения словоформ, блоков текста и их признаков (рис. 4). Кроме того, из-за этого решения появилась, в сущности, вторая связь надкорпусной составляющей НБД с корпусной:

- (1) вхождение словоформы включено в блок текста (первая связь корпусной и надкорпусной составляющих);
- (2) блок текста имеет признак;
- (3) вхождение словоформы выступает в качестве лексического показателя признака блока текста (вторая связь корпусной и надкорпусной составляющих).

6 Запись сведений о нерелевантности пары фрагментов запросу

При работе со списком пар фрагментов параллельного текста, найденных по какому-либо поисковому запросу и подлежащих аннотированию, нередко возникает ситуация, когда часть пар в действительности оказывается нерелевантной этому запросу. Как правило, это обусловлено неснятой омонимией. Так, при поиске пар, где в русскоязычном фрагменте содержится глагол *постелить* в любых формах, в выдачу попадут случаи, подобные примеру 3.

Пример 3. Обломов сидел на краю постели. [И. А. Гончаров. Обломов (1848–1859)] Oblomov était assis sur le bord du lit. [Oblomov (пер. L. Jurgenson; 1988)]

Причина в том, что словоформа *постели* имеет семь морфологических разборов (приводятся в таблице; перечень используемых признаков и сокращений

Морфологические разборы словоформы *постели*

№	Лемма	Набор признаков	Расшифровка
1	постель	S, f, inan, sg, gen, norm	Существительное, женский род, неодушевленное, единственное число, родительный падеж, словарная форма
2	постель	S, f, inan, sg, dat, norm	Существительное, женский род, неодушевленное, единственное число, дательный падеж, словарная форма
3	постель	S, f, inan, sg, loc, norm	Существительное, женский род, неодушевленное, единственное число, предложный падеж, словарная форма
4	постель	S, f, inan, pl, nom, norm	Существительное, женский род, неодушевленное, множественное число, именительный падеж, словарная форма
5	постель	S, f, inan, pl, acc, norm	Существительное, женский род, неодушевленное, множественное число, винительный падеж, словарная форма
6	постелить	V, sg, pf, act, imper, 2p, norm	Глагол, единственное число, совершенный вид, действительный залог, повелительное наклонение, второе лицо, словарная форма
7	постлать	V, sg, pf, act, imper, 2p, norm	Глагол, единственное число, совершенный вид, действительный залог, повелительное наклонение, второе лицо, словарная форма

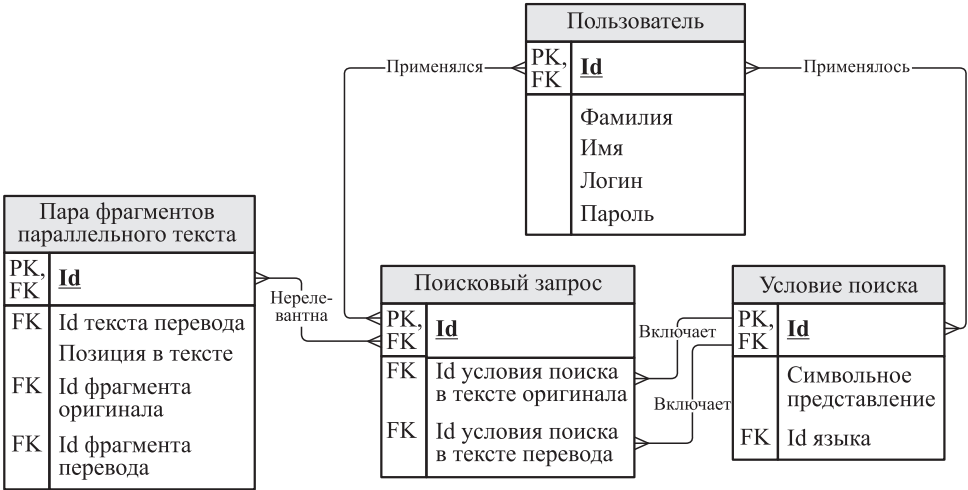


Рис. 5 Структура хранения данных о нерелевантности пар запросу

приведен в [14]), но лишь один из них — № 6 — действительно относится к глаголу *постелить*.

Следовательно, в процессе аннотирования переводных соответствий возникает ситуация, когда надо не только аннотировать переводные соответствия из пар, релевантных запросу, но и отмечать пары, нерелевантные запросу. Это приводит к необходимости создать третью связь надкорпусной составляющей НБД с корпусной и добавить таблицы для сохранения данных о поисковом запросе и условиях поиска, применявшихся пользователем (рис. 5).

Под поисковым запросом понимается совокупность двух условий поиска — в тексте оригинала и в тексте перевода, причем каждое условие привязывается к языку. Принимая во внимание, что одни и те же поисковые запросы и/или условия поиска могут применяться разными пользователями, связи между этими объектами и пользователями имеют тип многие-ко-многим. Это решение позволяет избежать дублирования данных и легко получать сведения о том, какие пары отмечены как нерелевантные некоторому поисковому запросу/условию поиска вне зависимости от того, какой пользователь добавил эту отметку.

7 Заключение

Подводя итоги, можно сделать вывод, что развитие структуры НБД, описанное в настоящей статье, приводит к повышению качества результирующих данных с точки зрения их полноты и системности, а также к получению более гибкой структуры данных. Хотя потребность в каждом из перечисленных изменений структуры данных может различаться в зависимости от особенностей выполняемого проекта, ни одно из описанных изменений не зависит от целей и задач какого-либо конкретного исследования, проводимого с использованием НБД.

Литература

1. Кружков М. Г. Информационные ресурсы контрастивных лингвистических исследований: электронные корпуса текстов // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 2. С. 140–159. EDN: UBFBRF.
2. Зацман И., Кружков М., Лоцилова Е. Методы и средства информатики для описания структуры неоднословных коннекторов // Структура коннекторов и методы ее описания / Под ред. О. Ю. Иньковой. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2019. С. 205–230. doi: 10.30826/SEMANTICS19-06. EDN: YVAJWN.
3. Кружков М. Г. Концепция построения надкорпусных баз данных // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 3. С. 101–112. doi: 10.14357/08696527210309. EDN: UMWNIU.
4. Егорова А. Ю., Зацман И. М., Мамонова О. С. Надкорпусные базы данных в лингвистических проектах // Системы и средства информатики, 2019. Т. 29. № 3. С. 77–91. doi: 10.14357/08696527190307. EDN: FCPPFH.

5. Нуриев В. А., Кружков М. Г. Корпусные данные при контрастивном изучении пунктуации // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 1. С. 14–23. doi: 10.14357/08696527230102. EDN: JOUMFY.
6. Гончаров А. А. Поиск с исключением в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 4. С. 102–114. doi: 10.14357/08696527230410. EDN: CVPFDV.
7. Дурново А. А., Инькова О. Ю., Попкова Н. А. Архитектура базы данных иерархии логико-семантических отношений // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 1. С. 114–125. doi: 10.14357/08696527220111. EDN: RKYUXV.
8. Дурново А. А., Инькова О. Ю., Попкова Н. А. Интерфейс пользователя Надкорпусной базы данных иерархий логико-семантических отношений // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 3. С. 103–115. doi: 10.14357/08696527220310. EDN: JZUCUX.
9. Дурново А. А., Инькова О. Ю., Нуриев В. А. Интеграционные возможности надкорпусных баз данных // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 1. С. 24–34. doi: 10.14357/08696527230103. EDN: YKHNIX.
10. Гончаров А. А. Аннотирование параллельных корпусов: подходы и направления развития // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 4. С. 81–87. doi: 10.14357/19922264230411. EDN: GDKDOZ.
11. Kruzikov M. G., Buntman N. V., Loshchilova E. Ju., Sitchinava D. V., Zalisnik A. A., Zatsman I. M. A Database of Russian verbal forms and their French translation equivalents // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. — М.: РГГУ, 2014. Вып. 13(20). С. 275–287. EDN: SKKDWB.
12. Семантика коннекторов: контрастивное исследование / Под ред. О. Ю. Иньковой. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2018. 368 с.
13. Добровольский Д. О., Зализняк А. А. Немецкие конструкции с модальными глаголами и их русские соответствия: проект надкорпусной базы данных // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. — М.: РГГУ, 2018. Вып. 17(24). С. 172–184. EDN: LZRUTR.
14. Национальный корпус русского языка. Морфологическая разметка. Морфологический стандарт Национального корпуса русского языка. <https://ruscorpora.ru/page/instruction-morph>.

Поступила в редакцию 15.09.24

DEVELOPING THE STRUCTURE OF SUPRACORPORA DATABASES

A. A. Goncharov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The paper presents the methods for developing the structure of supracorpora databases to provide a more detailed representation of the results from parallel text analysis. The initial data structure for the annotation of

translation correspondences is examined and four methods for its improvement are described. These methods provide the possibilities (*i*) to mark up the original and translation text blocks in more detail; (*ii*) to classify the features of a text block using multiple facets; (*iii*) to save data about lexical markers of text block features; and (*iv*) to save data about the irrelevance of text fragments pairs to a search query. All these possibilities allow improving the quality of the final data in terms of its completeness and consistency and the corresponding changes in the data structure can make it more flexible. The proposed changes to the data structure are independent of the goals and objectives of any specific study that may be conducted using supracorpora databases.

Keywords: supracorpora database; parallel texts; text annotation; corpus linguistics

DOI: 10.14357/08696527240406

EDN: BCFEHI

Acknowledgments

The research was carried out using the infrastructure of the Shared Research Facilities “High Performance Computing and Big Data” (CKP “Informatics”) of FRC CSC RAS (Moscow).

References

1. Kruzhkov, M. G. 2015. Informatsionnye resursy kontrastivnykh lingvisticheskikh issledovaniy: elektronnye korpusa tekstov [Information resources for contrastive studies: Electronic text corpora]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(2):140–159. EDN: UBFBRF.
2. Zatsman, I., M. Kruzhkov, and E. Loshchilova. 2019. Metody i sredstva informatiki dlya opisaniya struktury neodoslovnykh konnektorov [Methods and means of informatics for multiword connectives structure description]. *Struktura konnektorov i metody ee opisaniya* [Connectives structure and methods of its description]. Ed. O. Yu. Inko-va. Moscow: TORUS PRESS. 205–230. doi: 10.30826/SEMANTICS19-06. EDN: YVAJWN.
3. Kruzhkov, M. G. 2021. Kontseptsiya postroeniya nadkorpusnykh baz dannykh [Conceptual framework for supracorpora databases]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(3):101–112. doi: 10.14357/08696527210309. EDN: UMWNIU.
4. Egorova, A. Yu., I. M. Zatsman, and O. S. Mamonova. 2019. Nadkorpusnye bazy dannykh v lingvisticheskikh proektakh [Supracorpora databases in linguistic projects]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 29(3):77–91. doi: 10.14357/08696527190307. EDN: FCPPFH.
5. Nuriev, V. A., and M. G. Kruzhkov. 2023. Korpusnye dannye pri kontrastivnom izuchenii punktuatsii [The parallel corpora perspective on studying contrastive punctuation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(1):14–23. doi: 10.14357/08696527230102. EDN: JOUMFY.
6. Goncharov, A. A. 2023. Poisk s isklyucheniem v parallel'nykh tekstakh [Search with exclusion in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(4):102–114. doi: 10.14357/08696527230410. EDN: CVPFDV.

7. Durnovo, A. A., O. Yu. Inkova, and N. A. Popkova. 2022. Arkhitektura bazy dannykh ierarkhii logiko-semanticheskikh otnosheniy [Database of hierarchies of logical-semantic relations: Architecture]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(1):114–125. doi: 10.14357/08696527220111. EDN: RKYUXV.
8. Durnovo, A. A., O. Yu. Inkova, and N. A. Popkova. 2022. Interfeys pol'zovatelya Nadkorpusnoy bazy dannykh ierarkhiy logiko-semanticheskikh otnosheniy [Database of hierarchies of logical-semantic relations: User interface]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(3):103–115. doi: 10.14357/08696527220310. EDN: JZUCUX.
9. Durnovo, A. A., O. Yu. Inkova, and V. A. Nuriev. 2023. Integratsionnye vozmozhnosti nadkorpusnykh baz dannykh [Integration capacities of supracorpora databases]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(1):24–34. doi: 10.14357/08696527230103. EDN: YKHVIX.
10. Goncharov, A. A. 2023. Annotirovanie parallel'nykh korpusov: podkhody i napravleniya razvitiya [Parallel corpus annotation: Approaches and directions for development]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(4):81–87. doi: 10.14357/19922264230411. EDN: GDKDOZ.
11. Kruzhkov, M. G., N. V. Buntman, E. Ju. Loshchilova, D. V. Sitchinava, A. A. Zalisniak, and I. M. Zatsman. 2014. A database of Russian verbal forms and their French translation equivalents. *Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nye tekhnologii* [Computer Linguistics and Intellectual Technologies] 13(20):275–287. EDN: SKKDWB.
12. Inkova, O. Yu., ed. 2018. *Semantika konnektorov: kontrastivnoe issledovanie* [Semantics of connectives: A contrastive study]. Moscow: TORUS PRESS. 368 p.
13. Dobrovol'skiy, D. O., and A. A. Zalizniak. 2018. Nemetskie konstruksii s modal'nymi glagolami i ikh russkie sootvetstviya: proekt nadkorpusnoy bazy dannykh [German constructions with modal verbs and their Russian correlates: A supracorpora database project]. *Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nye tekhnologii* [Computer Linguistics and Intellectual Technologies]. Moscow: RGGU. 17(24):172–184. EDN: LZRUTR.
14. Natsional'nyy korpus russkogo yazyka. Morfologicheskaya razmetka. Morfologicheskii standart Natsional'nogo korpusa russkogo yazyka [Russian national corpus. Morphology. The morphological standard of the RNC]. Available at: <https://ruscorpora.ru/page/instruction-morph> (accessed October 15, 2024).

Received September 15, 2024

Contributor

Goncharov Alexander A. (b. 1994) — scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; a.gonch48@gmail.com

ТЕОРИЯ S-СИМВОЛОВ: РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

В. Д. Ильин¹

Аннотация: Представлена новая версия теории S-символов (с дополнениями и уточнениями). Теория S-символов изучает построение взаимосвязанных систем S-(символов, кодов и сигналов) для создания формализованных языков (включая языки спецификации и программирования); символьное моделирование произвольных объектов (S-моделирование), включая системы понятий и знаний; построение символьно-кодowo-сигнальной среды (S-среды); конструирование S-объектов на основе систем знаний (включая программные системы и информационные ресурсы). S-среда служит инфраструктурным основанием для решения задач исследовательской, инженерной и другой деятельности с помощью программируемых машин (S-машин). Теория S-символов рассматривается как часть методологического обеспечения разработок формализованных языков, систем знаний и др., выполняемых в S-среде. В новой версии теории добавлен раздел о формоориентированных языках с семантической разметкой (S-языках) и приведено определение системы знаний о произвольном S-объекте. Приведены примеры применения в автоматизации программирования, цифровизации системы государственного управления и экономического механизма.

Ключевые слова: теория S-символов; формоориентированные языки с семантической разметкой (S-языки); S-системы знаний; S-среда; S-моделирование; S-машина; технологии цифровизации

DOI: 10.14357/08696527240407

EDN: JQYQGW

1 Введение

Трудно найти природные или изобретенные людьми объекты с нетривиальным целевым поведением, функционирование которых не было бы сопряжено с использованием *взаимосвязанных систем символов, кодов и сигналов*. Человек принимает сообщения, составленные из световых, звуковых, тактильных, запаховых и вкусовых сигналов. После обработки органами восприятия сообщения преобразуются в кодовую форму, пригодную для обработки нервной системой и/или мозгом. Код сообщения, обработанный мозгом, преобразуется в символьную форму (графического, аудио- или другого образа), позволяющую осмыслить сообщение. Эффективность *символьно-кодowo-сигнальных решений* определяет качество функционирования *устройств с программируемым поведением* (компьютеров, смартфонов и др.). В теории *S-символов* такие устройства названы *S-машинами*² [1–4].

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, vdilyin@yandex.ru

²Префикс S- означает принадлежность понятий теории S-символов.

Интеллектуальное совершенствование человечества всегда было связано с ростом умения создавать и применять взаимосвязанные *S*-(*символьные, кодовые и сигнальные*) системы для языков *символьного моделирования произвольных объектов* (*S-моделирования*) и построения *S-систем знаний* [5–7]. Этапными изобретениями на этом пути стали *алфавиты* (*аудио- и графические системы символов*) и *языки*, послужившие развитию *речи и письменности* (способов построения *графических моделей речевых сообщений*) [1–4].

Впервые рассуждения о значении *символьного представления сущностей* для *систем искусственного интеллекта* были опубликованы в 1975 г. в работе [8].

Понятие *S-моделирования* было определено в 1989 г. в книге о *системе порождения программ* и методологии автоматизированного конструирования целевых программных систем [9, с. 248–249].

Опубликованная в 2023 г. первая версия *теории S-символов* [1–4] служит расширенным обобщением *теории S-моделирования* [10, 11]. Ряд результатов, представленных в данной статье, уточняет и дополняет теорию *S-символов*. Приведены примеры применения этой теории.

Результативность применения методологического и технологического обеспечения процессов цифровизации во многом зависит и от результатов своевременной модернизации инфраструктурных средств *символьно-кодово-сигнальной среды* (*S-среды*) [1–4]. Эти средства необходимы для реализации технологий *облачных вычислений* [12], *цифровых двойников* (англ. Digital Twins) [13, 14] и *семантического веба* (*Semantic Web*) [15, 16].

Формализованная запись и разметка текста. Для записи определений, замечаний и примеров в статье используются средства языка *TSM-комплекса* (*TSM: Textual Symbolic Modeling*) [1–4, 9].

Средства выделения фрагментов текста, применяемые в статье:

□ ⟨фрагмент текста⟩ □ ≈ определение или утверждение (символ ≈ заменяет слово «означает»);

◇ ⟨фрагмент текста⟩ ◇ ≈ замечание;

○ ⟨фрагмент текста⟩ ○ ≈ пример.

Первые вхождения названий понятий и наиболее важные фрагменты текста выделены курсивом.

2 Теория S-символов: методологический арсенал

Обрастая дополнениями и применениями [в *автоматизации программирования, построении систем знаний* и др. (выборка примеров приведена в разд. 3)], прирастает, совершенствуется и апробируется *методологический арсенал теории S-символов* [17].

В первой версии *теории S-символов* [1–4] были представлены ее *концептуальные основания* [1], включающие определения *S*-(*символов, кодов, сигналов*) и *S-символьных конструкций* (как *S-объектов, свойства, взаимосвязи и методы построения которых изучаются в этой теории*). Были введены определения

элементарных и составных S-символов, видов и типов S-символов, S-отношений и типизации S-объектов; определения S-сообщения и S-системы понятий. ◇ S-объект рассматривается как отображение изучаемого объекта в символично-кодowo-сигнальную среду (S-среду), выполненное при заданных ограничениях. S-объект может иметь произвольную физическую сущность и сложность, быть природным или созданным людьми, воплощенным или мыслимым. ◇

В разделе, посвященном *формализации знаний об S-задачах* [2], были даны определения S-задачных объектов [S-(задачи, алгоритма, программы, данных, модели задачной области, задачного графа); разрешающих структур на S-задачном графе, системы знаний об S-задачных объектах и др.]. Приведено описание методологии конструирования S-задачных объектов.

В разделе о *сетевом табс¹-решателе S-задач* [3] приведено описание S-модели кооперативного решателя задач, представляющего собой сеть решателей задач, в которой каждый узел может взаимодействовать с любым другим узлом этой сети. Каждый участник кооперации, представляющий собой *целевую конвейерную S-машину* (вычислительную или исчислительную), имеет *цифрового двойника* [13, 14] и специализируется на определенном классе задач из заданной предметной области. Обучающиеся цифровые двойники служат средством совершенствования функционирования отдельных узлов и всей сетевой кооперации.

В разделе о *классах базовых S-задач* [4] на основании изучения назначения и свойств различных S-задач, решаемых с помощью S-машин, даны определения восьми основных классов задач: S-представления; S-преобразования; S-распознавания; S-конструирования; S-интерпретации; S-обмена; S-(сохранения; накопления и поиска); S-(информационной защиты и криптографии).

2.1 S-языки

Языки на основе звуковых и жестовых систем символов стали первыми языками сообщений [1].

Этапным изобретением человечества, повлиявшим на развитие языков, стало рисование (*графическое моделирование реальных и воображаемых сущностей*). Рисование сделало возможным создание *графических моделей* не только видимых объектов, но и *сущностей, не имеющих прообразов в реальности*.

Важным (для развития языков) результатом стало изобретение и применение *графических схем* в роли *графических моделей*, отражающих *устройство и/или свойства, и/или функциональность* объектов.

Схематические изображения звуков речи лежат в основе изобретений *алфавитов* и *графических моделей речевых сообщений*. Так создавалась *письменность* и развивался *символьный инструментальный абстрактного мышления*, от совершенства которого зависят судьбы изобретений и открытий.

◇ В множестве изучаемых в теории S-символов языков выделено подмножество *инструментальных S-языков*, которые служат для создания S-сообщений

¹Табс — многослойная таблица с типизированными клетками [3, 9]. На основе табсов построена система управления базами данных каждого узла сетевого табс-решателя S-задач.

в соответствии с теорией S-символов. Они используются и для описания этой теории. ◇

Инструментальные S-языки. В инструментальных S-языках воплощается взгляд на эффективные описания S-объектов (S-задач, S-систем знаний и др.), рассчитанные на интерпретацию исследователями, разработчиками и помогающими им S-машинами. Поскольку люди имеют разные взгляды на эффективность и удобство инструментальных языков, целесообразно стремиться к построению мультязычной среды. Исследователи и разработчики должны иметь возможность пользоваться теми S-языками, которые считают наиболее подходящими для решения интересующих их задач.

□ *Инструментальными S-языками* называем формализованные *формоориентированные языки с семантической разметкой*, предназначенные для создания спецификаций S-задач [2], S-систем знаний [5–7] и других S-сообщений [1]. □

По формам представления S-сообщений в теории S-символов выделены два основных класса S-языков: для создания *последовательных S-сообщений* (с разбивкой на страницы, строки и другие составляющие) и *табличных S-сообщений* [в форме однослойных и многослойных табличных структур (табсов [3, 9])].

Семантическая разметка S-сообщения предназначена для выделения определений, примеров и других частей сообщения, имеющих заданную смысловую нагрузку.

○ К S-языкам относятся *табс-ориентированные языки описания систем знаний об S-задачах* [2, 6, 9], язык «Образ» [11, 18, 19] и язык TSM [1–4, 9].

◇ Среди *графических формоориентированных языков с семантической разметкой* почетное место принадлежит языку нотной записи музыкальных произведений¹. Благодаря изобретению и развитию этого языка стало возможным сохранение, накопление (как *информационных ресурсов* [20]) и распространение музыкальных произведений ◇ ○

◇ Серьезный поворот в переоценке монопольной роли текстовых инструментальных языков наметился в начале 1980-х гг. В те годы недостатки многих работ по автоматизации программирования были связаны со стремлением дать логически заверченный образ создаваемой системы автоматизации программирования, используя монолог или диалог в последовательной текстовой среде. Привычка отображать результаты работы на последовательностях бумажных или экранных страниц оказала решающее влияние на архитектуру большинства разработанных к тому времени систем автоматизации программирования [9]. ◇

2.2 S-система знаний об S-объекте

□ *S-система знаний* =: $\langle \text{ca} \approx \text{S-система } S_c \text{ понятий, описывающая S-объект} \rangle$, $\langle \text{set}^{\text{lng}} \approx \text{S-модель совокупности S-языков сообщений, интерпретируемых на ca} \rangle$,

¹Музыкальная нотация // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.рф/Музыкальная_нотация.

$\langle \text{set}^{\text{intr}} \approx S\text{-модель совокупности интерпретаторов } S\text{-сообщений, составленных на языках из } \text{set}^{\text{lng}} \rangle$. $\square$

$\square$ *S-система понятий* =: $\langle S\text{-модель системы понятий} \rangle$, $\langle \text{спецификация применимости } S\text{-системы понятий} \rangle$.

$\langle S\text{-модель системы } S^{\text{sc}} \text{ понятий} \rangle$ =: $\langle \text{множество } S^{\text{sc}} \text{ понятий} \rangle$, $\langle \text{семейство } \text{rel}(S^{\text{sc}}) \text{ связей, заданных на } S^{\text{sc}} \rangle$.

$\langle \text{Спецификация применимости } S\text{-системы понятий} \rangle$ =: $\langle \text{области применимости} \rangle$, $\langle \text{типы корреспондентов} \rangle$, $\langle \text{стадии применимости} \rangle$. $\square$

Чтобы проверить, может ли изучаемое S-сообщение изменить некоторую S-систему знаний са, его необходимо интерпретировать на са.

Процесс интерпретации на са сообщения (называемого входным и представленного на S-языках из совокупности set^{lng}):

- (1) построение выходного сообщения по заданному входному;
- (2) анализ выходного сообщения (требуются ли изменения в са);
- (3) если требуется, то изменение са; если нет — завершение [1, 2].

3 Формирование и апробация методологического арсенала теории S-символов

Методы теории S-символов создавались как средства решения задач научно-технических проектов, в выполнении которых участвовал автор. Основная часть этих проектов, выполненных в Институте проблем информатики РАН, была посвящена теории и применениям S-моделирования.

3.1 Конструирование целевых программных систем с заданными характеристиками на основе S-системы знаний о задачах

На начальных этапах *теория S-символов* формировалась на основе результатов, полученных в работах по *автоматизации программирования*. В 1989 г. была завершена разработка *методологии конструирования целевых программных систем с заданными характеристиками на основе S-системы знаний о задачах*. Прикладным результатом этой методологии стала *система порождения программ*, в которой программируемые задачи рассматриваются как *S-объекты* [9]. Целевые системы представлены как результаты *поиска разрешающих структур на задачных графах* [9, 21]. В 1994–1995 гг. была создана *методология конструирования параллельных программ на основе системы знаний о программируемых задачах*. В ней был представлен *S-язык обработки знаний о задачах «Образ»* и *S-метод распараллеливания программ* [18]. Позднее эта методология была усовершенствована [19].

♦ Методы конструирования *целевых программных систем с заданными характеристиками* развиваются также в работах других авторов, занимающихся

исследованиями и производством программных продуктов (○ в работах последних лет [22–24] и других работах ○). ◇

3.2 S-модели системы ситуационного государственного управления и нормализованного экономического механизма

В 1996 г. в процессе участия в проекте информатизации системы государственного управления России была создана и реализована *методология ситуационной информатизации государственного управления* [25]. Механизм государственного управления был представлен как *S-объект ситуационного управления*, а *задачи государственного управления* — как *S-задачи*. Контроль состояния S-объекта осуществлялся путем S-машинного сравнения текущих значений переменных состояния *совокупности госпространств* (экономического, оборонного и др.) с целевыми значениями, задаваемыми экспертами *Обеспечивающей стороны*. На основе анализа разностей отыскивались рекомендуемые (*Решающей стороне*) управляющие воздействия.

Нормализованный экономический механизм (НЭМ) изучается как организационно-техническая система, связанная *отношениями координации и подчинения* [26, 27] с системой государственного управления. Технологии договорных отношений в цифровой среде, платежного и товарного кредитования, онлайн-банкинга и другие технологии *нормализованного товарно-денежного обращения* НЭМ реализуются на основе онлайн-сервисов, функционирующих в S-среде; НЭМ представлен как S-объект.

◇ Предложенные S-модели, методы и технологии их реализации также развиваются другими исследователями и разработчиками информационных технологий, занимающимися задачами цифровой экономики (○ в работах последних лет [28–30] и других работах ○). ◇

4 Заключение

Представлена обновленная версия теории S-символов [1–4], дополненная разделом о формоориентированных языках с семантической разметкой (S-языках) (подразд. 2.1) и определением обобщенной S-системы знаний об S-объекте¹ (подразд. 2.2).

Приведены примеры применения в конструировании программных систем, S-моделировании ситуационной системы государственного управления и нормализованного экономического механизма (разд. 3)².

¹ В первой версии теории S-символов было приведено определение S-системы знаний об S-задачных объектах [2].

² Обновляемая выборка публикаций, цитирующих работы по методологии S-моделирования и ее применениям, приведена в статье «Символьное моделирование (S-моделирование)», опубликованной в энциклопедии Руниверсалис. [https://руни.рф/Символьное_моделирование_\(S-моделирование\)#Примеры_цитирования_работ_по_методологии_S-моделирования_и_ее_применению](https://руни.рф/Символьное_моделирование_(S-моделирование)#Примеры_цитирования_работ_по_методологии_S-моделирования_и_ее_применению).

Литература

1. Ильин В. Д. Теория S-символов: концептуальные основания // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 1. С. 126–134. doi: 10.14357/08696527230112. EDN: OCIEKY.
2. Ильин В. Д. Теория S-символов: формализация знаний об S-задачах // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 2. С. 124–131. doi: 10.14357/08696527230212. EDN: ACFEQB.
3. Ильин В. Д. Теория S-символов: сетевой табс-решатель S-задач // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 3. С. 141–148. doi: 10.14357/08696527230312. EDN: EJHIQJ.
4. Ильин В. Д. Теория S-символов: классы базовых S-задач // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 4. С. 139–148. doi: 10.14357/08696527230413. EDN: YLGBME.
5. Ильин В. Д., Соколов И. А. Символьная модель системы знаний информатики в человеко-автоматной среде // Информатика и её применения, 2007. Т. 1. Вып. 1. С. 66–78. EDN: JTESDO.
6. Ильин А. В., Ильин В. Д. Систематизация знаний о программируемых задачах // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 3. С. 192–203. EDN: SXZJEP.
7. Knowledge technology and systems / Ed. Y. Nakamori. — Toward establishing knowledge systems science ser. — Singapore: Springer, 2023. 287 p. doi: 10.1007/978-981-99-1075-5.
8. Newell A., Simon H. A. Computer science as empirical inquiry: Symbols and search // Commun. ACM, 1976. Vol. 19. No. 3. P. 113–126. doi: 10.1145/360018.360022.
9. Ильин В. Д. Система порождения программ. — М.: Наука, 1989. 264 с.
10. Ильин А. В., Ильин В. Д. Основы теории S-моделирования. — М.: ИПИ РАН, 2009. 144 с. EDN: VSGOMN.
11. Ilyin V. D. Symbolic modeling (S-modeling): An introduction to theory // Artificial intelligence trends in systems / Ed. R. Silhavy. — Lecture notes in networks and systems ser. — Cham: Springer, 2022. Vol. 502. P. 585–591. doi: 10.1007/978-3-031-09076-9_54.
12. Xiaoyu W., Zhengming G. Research and development of data security multidimensional protection system in cloud computing environment // Conference (International) on Advance in Ambient Computing and Intelligence Proceedings. — Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2020. P. 67–70. doi: 10.1109/ICAACI50733.2020.00019.
13. Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti M. Digital twin paradigm: A systematic literature review // Comput. Ind., 2021. Vol. 130. Art. 103469. 23 p. doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
14. Nguyen H., Trestian R., To D., Tatipamula M. Digital twin for 5G and beyond // IEEE Commun. Mag., 2021. Vol. 59. No. 2. P. 10–15. doi: 10.1109/MCOM.001.2000343.
15. What is the Semantic Web? — W3C, 2024. <https://www.w3.org/RDF/FAQ>.
16. Kulesza R., de Sousa M. F., de Araújo M. L. M., et al. Evolution of web systems architectures: A roadmap // Special topics in multimedia, IoT and Web technologies /

- Eds. V. Roesler, E. Barrère, R. Willrich. — Cham: Springer, 2020. P. 3–21. doi: 10.1007/978-3-030-35102-1_1.
17. *Ilyin V. D.* The theory of S-symbols in the methodological arsenal of artificial intelligence // *Int. J. Open Information Technologies*, 2024. Vol. 12. No. 3. P. 122–128. EDN: SNFUAJ.
 18. *Ilyin V. D.* A methodology for knowledge based engineering of parallel program systems // 8th Conference (International) on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems Proceedings. — Gordon and Breach Science Pubs., Inc., 1995. P. 805–809.
 19. *Ilyin A. V., Ilyin V. D.* Updated methodology for task knowledge based development of parallel programs // *Data science and intelligent systems* / Eds. R. Silhavy, P. Silhavy, Z. Prokopova. — Lecture notes in networks and systems ser. — Cham: Springer, 2021. Vol. 231. P. 319–328. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_25.
 20. *Ильин В. Д.* Конструирование целевых информационных ресурсов // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*, 2023. Т. 19. № 2. С. 333–339. doi: 10.25559/SITITO.019.202302.333-339. EDN: ZSNATQ.
 21. *Ильин А. В.* Конструирование разрешающих структур на задачных графах системы знаний о программируемых задачах // *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2007. № 3. С. 30–36. EDN: KUUGUN.
 22. *Доренская Е. А., Куликовская А. А., Семенов Ю. А.* Язык описания проблемы и исследование его возможностей // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*, 2020. Т. 16. № 3. С. 653–663. doi: 10.25559/SITITO.16.202003.653-663. EDN: MIKDEN.
 23. *Крючков А. В., Степин Ю. П.* Концептуальные основы системы без программирования и ее возможное применение для импортозамещения в процессах разработки специального программного обеспечения АСУП // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*, 2021. № 9(578). С. 60–68. doi: 10.33285/0132-2222-2021-9(578)-60-68. EDN: FPPZON.
 24. *Охтилев М. Ю., Коромысличенко В. Н., Охтилев П. А.* Производство программ. Инженерный подход. — Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 140 с.
 25. *Ильин В. Д.* Основания ситуационной информатизации. — М.: Наука, 1996. 180 с.
 26. *Ильин В. Д.* Модель нормализованной экономики (НЭК-модель): основы концепции // *Управление большими системами*, 2009. Т. 25. С. 116–138. EDN: KKXUUB.
 27. *Ilyin A. V., Ilyin V. D.* Towards a normalized economic mechanism based on E-services // *AGRIIS on-line Papers in Economics and Informatics*, 2014. Vol. 6. No. 3. P. 39–49. doi: 10.22004/ag.econ.188734.
 28. *Бауэр В. П., Еремин В. В., Сильвестров С. Н., Смирнов В. В.* Экономическое моделирование процессов цифровой трансформации // *Ж. экономической теории*, 2019. Т. 16. № 3. С. 428–443. doi: 10.31063/2073-6517/2019.16-3.11. EDN: XRPZOT.
 29. *Сильвестров С. Н., Бауэр В. П., Еремин В. В., Лапенкова Н. В.* О цифровой трансформации предприятия в контексте системной экономической теории // *Экономическая наука современной России*, 2020. № 2(89). С. 22–45. doi: 10.33293/1609-1442-2020-2(89)-22-45. EDN: WLYFFF.

30. Kikavets V. V., Tsaregradskaya Y. K. The implementation of principles of the budget process in the financing of public procurement in the digital economy // Artificial intelligence: Anthropogenic nature vs. social origin / Eds. E. Popkova, B. Sergi. — Advances in intelligent systems and computing ser. — Cham: Springer, 2020. Vol. 1100. P. 28–35. doi: 10.1007/978-3-030-39319-9_4.

Поступила в редакцию 03.08.24

THEORY OF S-SYMBOLS: DEVELOPMENT AND APPLICATION

V. D. Ilyin

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The article presents a new version of the theory of S-symbols (with additions and clarifications). The theory of S-symbols studies the construction of interconnected systems of S-(symbols, codes and signals) to create formalized languages (including specification and programming languages); the symbolic modeling of arbitrary objects (S-modeling), including systems of concepts and knowledge; the construction of a symbolic-code-signal environment (S-environment); and the construction of S-objects based on knowledge systems (including software systems and information resources). The S-environment serves as an infrastructural basis for solving the problems of research, engineering, and other activities using programmable machines (S-machines). The theory of S-symbols is considered as a part of the methodological arsenal for the development of formalized languages, knowledge systems, etc. performed in the S-environment. The new version of the theory adds a section on form-oriented languages with semantic markup (S-languages) and provides a definition of the knowledge system about an arbitrary S-object. The examples of applications in the automation of programming, digitalization of the public administration system, and the economic mechanism are given.

Keywords: theory of S-symbols; form-oriented languages with semantic markup (S-languages); S-knowledge systems; S-environment; S-modeling; S-machine; digitalization technologies

DOI: 10.14357/08696527240407

EDN: JQYQGW

References

1. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: kontseptual'nye osnovaniya [Theory of S-symbols: Conceptual foundations]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(1):126–134. doi: 10.14357/08696527230112. EDN: OCIEKY.
2. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: Formalizatsiya znaniy ob S-zadachakh [Theory of S-symbols: Formalization of knowledge about S-problems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(2):124–131. doi: 10.14357/08696527230212. EDN: ACFEQB.

3. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: setevoy tabs-reshatel' S-zadach [Theory of S-symbols: Network tabs-solver of S-problems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(3):141–148. doi: 10.14357/08696527230312. EDN: EJHIQJ.
4. Ilyin, V. D. 2023. Teoriya S-simvolov: klassy bazovykh S-zadach [Theory of S-symbols: The classes of basic S-problems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(4):139–148. doi: 10.14357/08696527230413. EDN: YLGBME.
5. Ilyin, V. D., and I. A. Sokolov. 2007. Simvol'naya model' sistemy znaniy informatiki v cheloveko-avtomatnoy srede [The symbol model of informatics knowledge system in human–automaton environment]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 1(1):66–78. EDN: JTESDO.
6. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2014. Sistematizatsiya znaniy o programmiruemyykh zadachakh [Systematization of knowledge about programmable tasks]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(3):192–203. doi: 10.14357/08696527140314. EDN: SXZJEP.
7. Nakamori, Y., ed. 2023. *Knowledge technology and systems*. Toward establishing knowledge systems science ser. Singapore: Springer. 287 p. doi: 10.1007/978-981-99-1075-5.
8. Newell, A., and H. A. Simon. 1976. Computer science as empirical inquiry: Symbols and search. *Commun. ACM* 19(3):113–126. doi: 10.1145/360018.360022.
9. Ilyin, V. D. 1989. *Sistema porozhdeniya programm* [The system of program generating]. Moscow: Nauka. 264 p.
10. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2009. *Osnovy teorii S-modelirovaniya* [Basics of the theory of S-modeling]. Moscow: IPI RAN. 144 p. EDN: VSGOMN.
11. Ilyin, V. D. 2022. Symbolic modeling (S-modeling): An introduction to theory. *Artificial intelligence trends in systems*. Ed. R. Silhavy. Lecture notes in networks and systems ser. Cham: Springer. 502:585–591. doi: 10.1007/978-3-031-09076-9_54.
12. Xiaoyu, W., and G. Zhengming. 2020. Research and development of data security multidimensional protection system in cloud computing environment. *Conference (International) on Advance in Ambient Computing and Intelligence Proceedings*. Ottawa, ON, Canada: IEEE. 67–70. doi: 10.1109/ICAACI50733.2020.00019.
13. Semeraro, C., M. Lezoche, H. Panetto, and M. Dassisti. 2021. Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Comput. Ind.* 130:103469. 23 p. doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
14. Nguyen, H., R. Trestian, D. To, and M. Tatipamula. 2021. Digital twin for 5G and beyond. *IEEE Commun. Mag.* 59(2):10–15. doi: 10.1109/MTOM.001.2000343.
15. What is the Semantic Web? 2024. W3C. Available at: <https://www.w3.org/RDF/FAQ> (accessed October 14, 2024).
16. Kulesza, R., M. F. de Sousa, M. L. M. de Araújo, et al. 2020. Evolution of web systems architectures: A roadmap. *Special topics in multimedia, IoT and Web technologies*. Eds. V. Roesler, E. Barrère, and R. Willrich. Cham: Springer. 3–21. doi: 10.1007/978-3-030-35102-1_1.
17. Ilyin, V. D. 2024. The theory of S-symbols in the methodological arsenal of artificial intelligence. *Int. J. Open Information Technologies* 12(3):122–128. EDN: SNFUAJ.
18. Ilyin, V. D. 1995. A methodology for knowledge based engineering of parallel program systems. *8th Conference (International) on Industrial and Engineering Applications*

- of Artificial Intelligence and Expert Systems Proceedings*. Gordon and Breach Science Publ., Inc. 805–809.
19. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2021. Updated methodology for task knowledge based development of parallel programs. *Data science and intelligent systems*. Eds. R. Silhavy, P. Silhavy, and Z. Prokopova. Lecture notes in networks and systems ser. Cham: Springer. 231:319–328. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_25.
20. Ilyin, V. D. 2023. Konstruirovaniye tselevykh informatsionnykh resursov [Constructing of targeted information resources]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern Information Technologies and IT-Education] 19(2):333–339. doi: 10.25559/SITITO.019.202302.333-339. EDN: ZSNATQ.
21. Ilyin, A. V. 2007. Konstruirovaniye razreshayushchikh struktur na zadachnykh grafakh sistemy znaniy o programmirovaniykh zadachakh [Constructing of resolving structures on task graphs of the knowledge system about programmable tasks]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [J. Information Technologies and Computing Systems] 3:30–36. EDN: KUUGUN.
22. Dorenskaya, E. A., A. A. Kulikovskaya, and Yu. A. Semenov. 2020. Yazyk opisaniya problemy i issledovanie ego vozmozhnostey [Exploring possibilities of language for describing the problem]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern Information Technologies and IT-Education] 16(3):653–663. doi: 10.25559/SITITO.16.202003.653-663. EDN: MIKDEN.
23. Kryuchkov, A. V., and Yu. P. Stepin. 2021. Kontseptual'nye osnovy sistemy bez programmirovaniya i ee vozmozhnoe primeneniye dlya importozameshcheniya v protsessakh razrabotki spetsial'nogo programmogo obespecheniya ASUP [Conceptual foundations of the system without programming and its possible application for import substitution in the development of special software]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry] 9(578):60–68. doi: 10.33285/0132-2222-2021-9(578)-60-68. EDN: FPPZOH.
24. Okhtilev, M. Yu., V. N. Koromyslichenko, and P. A. Okhtilev. 2024. *Proizvodstvo programm. Inzhenernyy podkhod* [Program production. Engineering approach]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya. 140 p.
25. Ilyin, V. D. 1996. *Osnovaniya situatsionnoy informatizatsii* [Fundamentals of situational informatization]. Moscow: Nauka, Fizmatlit. 180 p.
26. Ilyin, V. D. 2009. Model' normalizovannoy ekonomiki (NEk-model'): osnovy kontseptsii [The model of normalized economics (NEc-model): Basics of framework]. *Upravleniye bol'shimi sistemami* [Large-Scale Systems Control] 25:116–138. EDN: KXXUUB.
27. 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. doi: 10.22004/ag.econ.188734.
28. Bauer, V. P., V. V. Eremin, S. N. Silvestrov, and V. V. Smirnov. 2019. Ekonomicheskoe modelirovaniye protsessov tsifrovoy transformatsii [Economic modeling of digital transformation processes]. *Zh. ekonomicheskoy teorii* [Russ. J. of Economic Theory] 16(3):428–443. doi: 10.31063/2073-6517/2019.16-3.11. EDN: XPZPOT.
29. Sil'vestrov, S. N., V. P. Bauer, V. V. Eremin, and N. V. Lapenkova. 2020. O tsifrovoy transformatsii predpriyatiya v kontekste sistemnoy ekonomicheskoy teorii [About digital transformation of the enterprise in the context of systemic economic theory]. *Ekonomi-*

- cheskaya nauka sovremennoy Rossii* [Economics of Contemporary Russia] 2(89):22–45. doi: 10.33293/1609-1442-2020-2(89)-22-45. EDN: WLYFFF.
30. Kikavets, V. V., and Y. K. Tsaregradskaya. 2020. The implementation of principles of the budget process in the financing of public procurement in the digital economy. *Artificial intelligence: Anthropogenic nature vs. social origin*. Eds. E. Popkova and B. Sergi. Advances in intelligent systems and computing ser. Cham: Springer. 1100:28–35. doi: 10.1007/978-3-030-39319-9_4.

Received August 3, 2024

Contributor

Ilyin Vladimir D. (b. 1937) — Doctor of Science in technology, professor, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; vdilyin@yandex.ru

ПРОБЛЕМЫ ЦЕЛЕПОЛАГАНИЯ В АППАРАТНО-ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «БЕЗОПАСНЫЙ ГОРОД»

А. А. Зацаринный¹, А. П. Сучков²

Аннотация: Проведен анализ концептуальных подходов к созданию аппаратно-программного комплекса (АПК) «Безопасный город» (БГ) с позиций обоснованного целеполагания с учетом необходимости рассмотрения такого показателя, как прогнозируемый ущерб от возможных чрезвычайных ситуаций (ЧС). На реальных примерах и на конкретной модели показано, что для реальной оценки степени рисков различных видов ЧС необходимо отойти от сложившейся практики фиксированной оценки рисков без учета конкретных условий в регионах и всех факторов влияния на их реальную величину, для чего необходимо создание системы расчета прогнозируемого ущерба. Рассмотрен основной подход к расчету прогнозируемого ущерба. Показано, что одно из основных направлений использования показателей прогнозируемого риска — определение размера возможных экономически целесообразных затрат на профилактику ЧС.

Ключевые слова: АПК «Безопасный город»; целеполагание; причиненный ущерб; предотвращенный ущерб; прогнозируемый ущерб

DOI: 10.14357/08696527240408

EDN: MZBSSN

1 Введение

На совещании по основным направлениям экономической политики страны на период до 2030 г. Президент России акцентировал внимание на новых нацпроектах, в первую очередь на достижении технологического суверенитета России [1]. Без достижения этой цели огромная страна с самой большой площадью и сравнительно небольшим населением не сможет выстоять в современном мире в условиях агрессивной борьбы за ресурсы и их передел. При этом одной из стратегических целей ставится обеспечение сохранности всего спектра огромнейших запасов природных ресурсов нашей страны.

В этом плане важнейшим комплексом мероприятий выступает программа «Построение и развитие аппаратно-программного комплекса “Безопасный город”», принятая во исполнение поручения Президента Российской Федерации от 27 мая 2014 г. № Пр-1175. Выполнение программы осуществляется на основе

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, AZatsarinny@ipiran.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ASuchkov@ipiran.ru

нормативной базы, включающей Концепцию построения и развития АПК БГ, Единые требования к техническим параметрам сегментов АПК БГ и другие нормативные правовые акты [2].

Компоненты АПК БГ к настоящему времени созданы и продолжают создаваться практически во всех субъектах РФ. При этом координирующую роль в выполнении работ на основе единых требований на протяжении многих лет осуществлял Совет главных конструкторов под председательством первого заместителя Министра МЧС РФ, в котором активное участие принимали представители ФИЦ ИУ РАН. Более того, в 2020 г. МЧС России на конкурсной основе задало системообразующую научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу (НИОКР) с целью научного обоснования информационно-аналитической модели для обеспечения межведомственного и межуровневого взаимодействия в информационно-коммуникационной инфраструктуре АПК БГ на основе единых технологических стандартов, включая разработку онтологической модели данных, прогнозно-аналитических моделей по всем видам и типам рисков, а также испытательного стенда для апробации и отладки программно-технических решений при проектировании и внедрении систем АПК. В рамках этой НИОКР предполагалось обеспечить системный подход к построению и развитию АПК БГ на территории субъектов и муниципалитетов РФ. Однако в 2022 г. указанная НИОКР была закрыта. Вместе с тем анализ технического задания (ТЗ) на АПК, а также результатов технического проектирования в отдельных субъектах (Оренбург, Курск, Ростов-на-Дону, Северная Осетия, Брянск и др.) показывает, что разработка АПК не учитывает ряд важных факторов жизнедеятельности субъектов в различных природных и климатических условиях.

В настоящей статье авторы на основе анализа материалов технического проектирования предлагают методические подходы к корректировке требований на разработку АПК в части системы показателей ущерба.

2 Сущность проблемы целеполагания в аппаратно-программном комплексе «Безопасный город»

Под целеполаганием понимается процесс установления и формализации целей, которые должны быть конкретными, измеримыми, достижимыми, обеспеченными ресурсами и привязанными ко времени [3]. Это предполагает формирование многоуровневой системы целевых показателей (ЦП), системы управления и определение критериев оценки ЦП всех уровней (пороговые значения и временная привязка), планирование и учет динамических целей [4–6].

В [6, 7] сделан анализ концептуальных подходов к созданию АПК БГ с позиций обоснованного целеполагания в рамках модели систем ситуационного управления, а также с учетом того, что в принятой Концепции в полной мере не конкретизируется возможность формирования системы целевых показателей АПК БГ. Кроме того, в ТЗ на разработку ряда региональных АПК отсутству-

ют требования к реализации положений Концепции в части целевых критериев и показателей (раздел VIII).

Таким образом, в созданных и создаваемых сегментах АПК отсутствует такой важный и определяющий функциональный блок, как целеполагание и связанные с ним подсистемы планирования и управления ЦП. Причина такого состояния дел — изначальное отсутствие таких функциональных системных требований. Кроме того, отсутствует такой важный раздел функциональных задач, как мониторинг и учет событий, связанных с процессами предупреждения возникновения ЧС, и, как следствие, не реализуются соответствующие положения Концепции в части управления процессами профилактики и предупреждения возможных угроз.

Необходимо отметить, что в результате рассмотрения проектов АПК БГ во многих регионах России возникают принципиальные замечания к ТЗ на их реализацию. Суть этих замечаний кратко состоит в следующем.

Целью создания АПК БГ в соответствии с принятыми концептуальными и нормативными документами ставится обеспечение информационного обмена, прогнозирования, мониторинга, предупреждения и ликвидации кризисных ситуаций и происшествий (КСиП). Несмотря на это, в технических заданиях на создание АПК большая часть требований к ним ориентирована на реализацию функций ликвидации, а не предупреждения КСиП. Такой подход стал следствием отсутствия обоснованного целеполагания в АПК БГ в виде системы измеримых целевых показателей системы, что является общегосударственной практикой в проектах федерального значения. При этом принципиальная необходимость введения в составе системы ЦП, таких как причиненный и предотвращенный ущерб, авторами неоднократно отмечалась [7, 8].

Последние разрушительные чрезвычайные ситуации природного характера показывают необходимость рассмотрения такого показателя, как **прогнозируемый ущерб** от возможных КСиП. Убедительным примером правильности такого научно-обоснованного подхода к формированию системы целевых показателей АПК БГ послужили события с наводнениями в Оренбургской области весной этого года. Многомиллиардный ущерб, причиненный государству, не был своевременно спрогнозирован, хотя все исходные данные для такого прогноза были. В результате не были спланированы предупредительные мероприятия и заградительные дамбы сооружались уже в сложных условиях непосредственно в процессе затопления. При этом очевидно, что предварительная оценка соотношения прогнозируемого ущерба и затрат на упреждающую реализацию необходимых мероприятий по предотвращению затопления позволила бы существенно снизить причиненный ущерб и государству, и конкретным жителям области.

Технические задания на все региональные АПК БГ ориентируют систему на совершенно некорректную методику оценки рисков, основанную на таблицах оценки «показателей рисков» на территории пилотных муниципальных образований, которая имеет две градации — «приемлемый риск» (один на

десять тысяч) и «повышенный риск» (один на тысячу), хотя общепринятый в научной практике показатель (степень) риска есть произведение вероятности реализации угрозы на прогнозируемый ущерб. Так, в ТЗ на АПК БГ по Оренбургской области (ТЗ исх. № 43-1799-2 от 28.03.2017) задана следующая «степень риска»:

Пример показателей риска по Оренбургской области

№ п/п	Наименование риска	Показатель риска	Временные показатели риска
Риски возникновения КСиП природного характера			
2.	Риски возникновения подтоплений (затоплений)	Приемлемый риск — 10^{-4}	Март–июнь

Такая грубая система оценки рисков представляется принципиально неприемлемой, так как дезориентирует функционирование АПК БГ в конкретных условиях и в конкретном регионе. Тем не менее именно такие оценки рисков, которые не предусматривают прогнозирование ущерба и оценку предотвращенного ущерба, заданы и уже реализованы в десятках регионов России (включая и Оренбургскую область). Такой подход к заданию требований к АПК БГ не позволяет предотвращать многие потенциальные (с учетом особенностей различных регионов России) причиненные ущербы (зачастую — многомиллиардные).

3 Предлагаемые подходы к расчету прогнозируемого ущерба

В [3, 7, 8] предложена структура иерархической системы ЦП, обеспечивающая полноценное целеполагание, где основными показателями служат *причиненный и предотвращенный* ущерб от ЧС. Последние события с наводнениями весной 2024 г. ярко показали необходимость учета *прогнозируемого* ущерба.

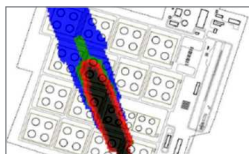
Предотвращенный ущерб W_u связан с прогнозируемым ущербом W_p (без учета профилактических мероприятий), причиненным ущербом W_c (с учетом профилактических мероприятий) и затратами Z на профилактические мероприятия, предотвращение и смягчение последствий от КСиП следующим очевидным соотношением [9]:

$$W_u = W_p + W_c - Z. \quad (1)$$

Расчет прогнозируемого ущерба можно осуществлять различными способами. Например, прогнозируемый ущерб в условиях отсутствия мер противодействия равен причиненному ущербу. Другую возможность оценивать прогнозируемый ущерб дает прецедентный подход. Богатая статистика КСиП, накопленная как в самом МЧС, так и, в частности, в практике страхования, может дать без особых усилий наборы прогнозируемых ущербов для однотипных объектов и КСиП. Учет затрат на профилактику ЧС, которые, несомненно, документально зафиксированы, тоже возможен при расчете по формуле (1).

Другой подход к расчету прогнозируемого ущерба предполагает использование расчетных задач, в частности (см. рисунок):

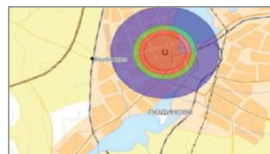
Техногенные ЧС



Аварии с химически опасными веществами

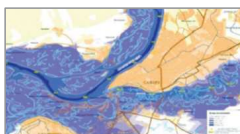


Пожары



Взрывы

Природные ЧС



Наводнения



Лесные и степные пожары

Пример визуализации расчетов по прогнозированию развития КСиП

- определение зон затопления с учетом уровня подъема воды, наличия защитных сооружений и рельефа местности;
- аварии с выбросом токсичных веществ и расчет зон заражения с учетом розы ветров;
- распространение пожаров в городской застройке, лесах и степных зонах;
- расчет зон поражения при взрывах.

При этом рассчитываются количество и виды затронутых объектов, численность пострадавшего населения, оценивается сценарный прогноз ущерба с учетом влияния различных факторов (благоприятное, среднее и неблагоприятное) и, наконец, рассчитываются прогнозируемые затраты на ликвидацию последствий КСиП.

Аппаратно-программный комплекс БГ располагает всеми этими программными средствами и данными [10].

Так, в акватории реки Урал зимой 2024 г. сложился ряд неблагоприятных факторов [11–13].

Во-первых, выпало очень много снега; при этом о реальной угрозе рекордного весеннего половодья синоптики и средства массовой информации предупреждали еще в феврале 2024 г. Так, в Башкортостане высота снежного покрова на 60% превысила норму.

Во-вторых, 1–2 апреля в зоне водосбора Урала началось резкое потепление до 14–18 °С. Снег, накопленный за зиму, стал интенсивно таять, и уже по истечении трех суток талая вода устремилась в реку Урал. Максимальный уровень воды, при котором существующие защитные дамбы могут защитить город Оренбург, составляет 5,5 м + 85 см запаса. По данным на 6 апреля уровень воды в реке существенно превысил допустимый и поднялся до 9,6 м.

В-третьих, большой вклад в наводнение внесло ПАО «Интер РАО», так как до начала паводка в водохранилище Ириклинской гидроэлектростанции был накоплен максимум воды, а затем лишнюю сбросили и затопили город, проигнорировав функцию регулирования водостока. На взгляд экспертов, это один из решающих факторов [12].

Итак, полагая в основание функциональности АПК БГ целевые показатели W_c — причиненный ущерб, W_u — предотвращенный ущерб и W_p — прогнозируемый ущерб, а также полноценную систему управления этими ЦП (мониторинг, планирование, анализ и прогнозирование), можно создать условия для использования всего спектра управляющих воздействий не только на непосредственные угрозы и риски возникновения ЧС, но и на косвенные причины их возникновения. Отметим, что в Концепции [2] такие косвенные угрозы подробно перечислены, но ни в реализованных сегментах АПК, ни в НИОКР БГ они никак не учитываются. В связи с этим для создания полноценной системы управления рисками необходимо:

- установление адекватной системы целей;
- выявление факторов влияния и управляющих воздействий на цели системы;
- моделирование этого влияния для оценки степени достижения целей системы.

Отметим, что показатель прогнозируемого ущерба, во-первых, необходим для реальной оценки степени рисков различных видов КСиП. При этом сложившаяся практика фиксированной во времени «потолочной» оценки рисков без учета конкретных условий в регионах и совокупности всех факторов влияния на их реальную величину оказалась очевидно необъективной и потому неприемлемой. Как уже упоминалось, общепринятый в научной практике показатель (степень) риска есть произведение вероятности реализации угрозы на прогнозируемый ущерб [13] и, как из этого следует, имеет стоимостное выражение.

Естественно, что задача оценки всех возможных степеней риска для всех объектов региона выглядит крайне затратной и в полном объеме не реализуемой. На практике необходимо оценочно (например, экспертным методом) выделить наиболее рискоопасные объекты, объекты с наибольшим возможным прогнозируемым ущербом и социально значимые объекты и осуществлять расчет потенциального риска для этих выделенных объектов. Для отображения степеней риска следует установить измеримую шкалу, например для КСиП разного уровня опасности (объектовая, муниципальная, региональная и федеральная) с определением градаций в стоимостном измерении прогнозируемого риска.

Отметим также, что принципиально нельзя фиксировать оценки степени риска при проектировании систем АПК БГ; целесообразно создать подсистему их динамического расчета и управления ими с учетом складывающейся специфики. Такой подход позволит существенно усилить профилактическую функцию АПК БГ на основе второго направления использования показателей прогнозируемого риска, а именно: определение возможных экономически целесообразных затрат на профилактику КСиП.

4 Оценка показателя прогнозируемого ущерба

Рассмотрим пример расчета предотвращенного ущерба. Допустим, что N_1 объектов региона оснащены некоторыми средствами защиты от КСиП, а N_2 — нет. Средний ущерб от КСиП, по данным статистики, на этих объектах составляет U_1 и U_2 соответственно; ясно, что $U_1 < U_2$. Допустим, что КСиП на этих объектах могут происходить с одинаковой вероятностью p .

Предположим, что на k из N_2 объектах проведены мероприятия по установке средств защиты общей средней стоимостью a рублей для каждого объекта.

Рассчитаем предотвращенный ущерб с учетом того, что (см. формулу (1))

$$W_p = pU_1N_1 + pU_2N_2; \quad W_c = pU_1(N_1 + k) + pU_2(N_2 - k); \quad Z = ak.$$

Тогда

$$W_u = pU_1N_1 + pU_2N_2 - pU_1(N_1 + k) - pU_2(N_2 - k) - ak.$$

Отсюда

$$W_u = k(pU_2 - pU_1 - a) \rightarrow \max_{0 \leq k \leq N_2}, \quad W_u > 0.$$

Если $p(U_2 - U_1) \geq a$, то максимум достигается при $k = N_2$. Это означает, что при общих затратах aN_2 получен положительный предотвращенный ущерб.

Из приведенного примера можно сделать важный вывод. В ТЗ на создание сегментов АПК БГ приводятся *некорректные* фиксированные оценки показателей риска (частот возникновения ЧС) для различных угроз, и они составляют один на тысячу и один на десять тысяч. Таким образом, при таком подходе экономически целесообразными профилактическими мероприятиями с точки зрения предотвращенного ущерба оказываются лишь те мероприятия, для которых справедливо соотношение

$$aN_2 \leq (10^{-3} \dots 10^{-4}) (U_2N_2 - U_1N_2).$$

Это означает, что затраты на профилактику КСиП должны быть на несколько порядков меньше, чем возможный ущерб. Такие условия могут быть, вероятно, выполнены в случае оборудования зданий соответствующими средствами (пожарной сигнализации, автоматического пожаротушения и др.).

Если применить предлагаемый подход к расчету реальной степени риска для случая наводнений в Оренбургской области, вероятность наводнения при самых благоприятных оценках вряд ли была ниже $1/2$, и тогда экономически целесообразными профилактическими мероприятиями следует считать те мероприятия, где

$$aN_2 \leq \frac{1}{2} (U_2N_2 - U_1N_2).$$

По заявлению губернатора области Д. В. Паслера, сумма ущерба от паводка в Оренбуржье составила более 40 млрд руб. [10], а значит, самая скромная оценка размера экономически целесообразных профилактических мероприятий составляет не менее 20 млрд руб. Отсюда следует, что реализация комплекса профилактических работ, включая возведение дамб, позволила бы, с одной стороны, существенно снизить вероятность затопления, а с другой — сэкономить значительные средства для государства (примерно 20 млрд руб.).

Если затраты превышают размеры возможного ущерба и $p(U_2 - U_1) < a$, то максимум $W_u = 0$ (в случае таких профилактических мероприятий, как ликвидация старого жилья, совершенствование инфраструктуры и т. п.) и значимость этих мероприятий оценивается по другим критериям, в частности как социально значимых.

5 Выводы

1. Основной недостаток существующей системы проектирования и создания АПК БГ кроется в отсутствии адекватной системы целей, а потому необходимо ввести в состав системы ЦП **причиненный, прогнозируемый и предотвращенный** ущерб.
2. Для реальной оценки степени рисков различных видов КСиП необходимо отойти от сложившейся практики фиксированной оценки рисков без учета конкретных условий в регионах и всех факторов влияния на их реальную величину, для чего необходимо создание системы расчета прогнозируемого ущерба.
3. Одно из основных направлений использования показателей прогнозируемого риска — определение размеров возможных экономически целесообразных затрат на профилактику КСиП.

Литература

1. Президент России Владимир Путин сменил вектор развития страны // URA.RU, 26 августа 2024 г. <https://ura.news/news/1052809969>.
2. Концепция построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город»: Распоряжение Правительства РФ от 3 декабря 2014 г. № 2446-р. <http://static.government.ru/media/files/OapBppc8jyA.pdf>.
3. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Информационное взаимодействие в распределенных системах ситуационного управления. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2021. 268 с. doi: 10.30826/94588-293-5. EDN: OGXXUY.
4. Сучков А. П. Формирование системы целей для ситуационного управления // Системы и средства информатики, 2013. Т. 23. № 2. С. 187–197. doi: 10.14357/08696527130213. EDN: ROYATF.

5. Сучков А. П. Полнофункциональный процессный подход к реализации систем ситуационного управления // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 85–99. doi: 10.14357/08696527170106. EDN: YODDAZ.
6. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Угрозы и риски реализации комплексных научно-технических программ в рамках приоритетов стратегии научно-технологического развития России // Системы и средства информатики, 2020. Т. 30. № 3. С. 97–111. doi: 10.14357/08696527200309. EDN: LNTVKI.
7. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Целеполагание в аппаратно-программном комплексе «Безопасный город»: задачи и реалии // Технологии гражданской безопасности, 2020. Т. 17. № 3. С. 69–74. doi: 10.54234/CST.19968493.2020.17.3.65.12.69. EDN: EYGFFI.
8. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Методический подход к оценке угроз и рисков реализации программы «Построение и развитие аппаратно-программного комплекса “Безопасный город”» // Информационные технологии и вычислительные системы, 2021. № 1. С. 32–41. doi: 10.14357/20718632210104. EDN: YCWNVR.
9. Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций. — М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС, 2004. 159 с.
10. Власти Оренбургской области подсчитали сумму ущерба от паводка. <https://www.kp.ru/online/news/5761607/?ysclid=m1emfa0hje643228555>.
11. Уровень реки Урал у Оренбурга приблизился к опасной отметке // Известия, 6 апреля 2024, 12:14. <https://iz.ru/1678000/2024-04-06/uroven-reki-ural-u-orenburga-priblizilsia-k-opasnoi-otmetke>.
12. Что стало причиной наводнений на Урале и в Сибири // Meduza, 19.04.2024. <https://milnews.ru/news-5205542-cto-stalo-prichinoj-navodnenij-na-urale-i-v-sibiri-ih-mogno-bylo-predotvratit-a-vinovaty-lyudi-ili-.html>.
13. Чибилев А. А. О летнем паводке и весеннем наводнении 2024 года на реке Урал и его притоках // Институт степи УрО РАН, 08.08.2024. <http://orensteppe.org/news/o-letnem-pavodke-i-vesennem-navodnenii-2024-goda-na-reke-ural-i-ego-pritokah>.

Поступила в редакцию 02.09.24

THE PROBLEMS OF GOAL SETTING IN THE HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX “SAFE CITY”

A. A. Zatsarinny and A. P. Suchkov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The article analyzes conceptual approaches to the creation of the agro-industrial complex “Safe City” from the standpoint of sound goal-setting taking into account the need to consider such an indicator as the predicted damage from possible emergencies. Using real examples and a specific model, it is shown that for a real assessment of the degree of risks of various types of emergencies, it is necessary to move away from the established practice of fixed risk assessment without taking into account specific conditions in the regions and all

factors influencing their real value, for which it is necessary to create a system for calculating the predicted damage. The main approaches for calculating the predicted damage are considered. It is proved that one of the main directions of using indicators of predicted risk is to determine the amount of possible economically feasible costs for emergency prevention.

Keywords: agro-industrial complex “Safe City;” goal setting; damage caused; damage prevented; predicted damage

DOI: 10.14357/08696527240408

EDN: MZBSSN

References

1. Prezident Rossii Vladimir Putin smenil vektor razvitiya strany [Russian President Vladimir Putin has changed the vector of the country’s development]. *URA.RU*, 26.08.2024. Available at: <https://ura.news/news/1052809969> (accessed October 14, 2024).
2. Kontseptsiya postroeniya i razvitiya apparatno-programmnogo kompleksa “Bezopasnyy gorod”: Rasporyazhenie Pravitel’sstva RF ot 3 dekabrya 2014 g. No.2446-r [The concept of construction and development of the hardware and software complex “Safe City”: Government decree No.2446-r dated 03.12.2014]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/OapBppc8jyA.pdf> (accessed October 14, 2024).
3. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2021. *Informatsionnoe vzaimodeystvie v raspredelennykh sistemakh situatsionnogo upravleniya* [Information interaction in distributed situational management systems]. Moscow: TORUS PRESS. 268 p. doi: 10.30826/94588-293-5. EDN: OGXXUY.
4. Suchkov, A. P. 2013. Formirovanie sistemy tseley dlya situatsionnogo upravleniya [Formation of the goals system for situational control]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 23(2):187–197. doi: 10.14357/08696527130213. EDN: ROYATF.
5. Suchkov, A. P. 2017. Polnofunktsional’nyy protsessnyy podkhod k realizatsii sistem situatsionnogo upravleniya [A fully functional process-based approach to the implementation of situational control systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(1):85–99. doi: 10.14357/08696527170106. EDN: YODDAZ.
6. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2020. Ugrozy i riski realizatsii kompleksnykh nauchno-tekhnicheskikh programm v ramkakh prioritetov strategii nauchno-tehnologicheskogo razvitiya Rossii [Threats and risks of implementing complex scientific and technical programs within the priorities of the Russian science and technology development strategy]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 30(3):97–111. doi: 10.14357/08696527200309. EDN: LNTVKI.
7. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2020. Tselepolaganie v apparatno-programmnom komplekse “Bezopasnyy gorod”: zadachi i realii [Goal setting in the hardware and software complex “Safe city”: Tasks and realities]. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil Security Technology] 17(3):69–74. doi: 10.54234/CST.19968493.2020.17.3.65.12.69. EDN: EYGFFI.

8. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2021. Metodicheskiy podkhod k otsenke ugroz i riskov realizatsii programmy “Postroenie i razvitie apparatno-programmnogo kompleksa “Bezopasnyy gorod” [Methodological approach to the assessment of threats and risks of the program implementation for the construction and development of the hardware and software complex “Safe City”]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel’nye sistemy* [J. Information Technologies and Computing Systems] 1:32–41. doi: 10.14357/20718632210104. EDN: YCWNVR.
9. *Edinaya mezhvedomstvennaya metodika otsenki ushcherba ot chrezvychaynykh situatsiy tekhnogennogo, prirodnogo i terroristicheskogo kharaktera, a takzhe klassifikatsii i ucheta chrezvychaynykh situatsiy* [Unified interdepartmental methodology for assessing damage from man-made, natural and terrorist emergencies as well as classification and accounting of emergencies]. 2004. Moscow: FGU VNII GOChS. 159 p.
10. Vlasti Orenburgskoy oblasti podschitali summu ushcherba ot pavodka [The authorities of the Orenburg region have calculated the amount of damage from the flood]. Available at: <https://www.kp.ru/online/news/5761607/?ysclid=m1emfa0hje643228555> (accessed October 14, 2024).
11. Uroven’ reki Ural u Orenburga priblizilsya k opasnoy otmetke [The Ural River near Orenburg has approached dangerous levels]. 06.04.2024, 12:14. *Izvestiya* [Izvestia]. Available at: <https://iz.ru/1678000/2024-04-06/uroven-reki-ural-u-orenburga-priblizilsia-k-opasnoi-otmetke> (accessed October 14, 2024).
12. Chto stalo prichinoy navodneniy na Urale i v Sibiri [What caused the floods in the Urals and Siberia]. 19.04.2024. Meduza. Available at: <https://milnews.ru/news-5205542-chto-stalo-prichinoy-navodnenij-na-urale-i-v-sibiri-ih-mogno-bylo-predotvratit-a-vinovaty-lyudi-ili-.html> (accessed October 14, 2024).
13. Chibilev, A. A. 08.08.2024. O letnem pavodke i vesennem navodnenii 2024 goda na reke Ural i ego pritokakh [About the summer flood and spring flood of 2024 on the Ural River and its tributaries]. *Institut stepi UrO RAN* [Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. Available at: <http://orensteppe.org/news/o-letnem-pavodke-i-vesennem-navodnenii-2024-goda-na-reke-ural-i-ego-pritokah> (accessed October 14, 2024).

Received September 2, 2024

Contributors

Zatsarinny Alexander A. (b. 1951) — Doctor of Science in technology, professor, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; AZatsarinny@ipiran.ru

Suchkov Alexander P. (b. 1954) — Doctor of Science in technology, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; ASuchkov@frccsc.ru

ПРОГРАММА РАН «ОПТИЧЕСКИЙ КОМПЬЮТЕР» И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

*В. П. Торчигин*¹

Аннотация: В рамках программы РАН «Оптический компьютер» при исследовании возможности создания оптических резонаторов, в которых световая волна циркулирует в однородном стекле, выяснилось, что такая возможность уже реализована в виде шаровой молнии в атмосфере Земли. В результате появилась оптическая модель шаровой молнии, согласно которой шаровая молния представляет собой просто циркулирующей свет, т. е. объект, в существование которого трудно поверить без дополнительных убедительных доказательств. Такие доказательства были получены. В многочисленных статьях показано полное сходство аномального поведения природных шаровых молний, которое основано на многолетних многочисленных свидетельствах очевидцев, с поведением циркулирующего света в атмосфере, которое следует из простых законов физики и оптики. Более того, оказалось, что в природе существует целый мир циркулирующего света, состоящий из объектов с аномальными свойствами. Это позволило объяснить другое не менее загадочное явление однопузырьковой сонолюминесценции. Изданы две книги по этой теме в Нью Йорке и Лондоне. Таким образом, последствием программы «Оптический компьютер» стало открытие нового мира циркулирующего света с необычными объектами, которые могут быть востребованы и в вычислительной технике.

Ключевые слова: передача оптических сигналов; шаровая молния; циркулирующий свет; молекулярное рассеяние света; 2D-световод

DOI: 10.14357/08696527240409

EDN: NALXDG

1 Введение

В начале 1990-х гг. в РАН в рамках программы «Оптический компьютер» проводились исследования возможности создания компьютера, в котором электрические сигналы заменены световыми. Было установлено, что оптические сигналы имеют преимущество перед электрическими при создании многих устройств вычислительной техники, особенно при организации коммуникационных сетей суперкомпьютеров и скоростной передачи сигналов на большие расстояния, где разумной альтернативы оптическим сигналам не существует. Это справедливо и для современных вычислительных систем, основанных на новых принципах организации вычислений [1, 2].

В то же время отмечалось, что при создании процессорных элементов электрические сигналы имеют преимущество, так как минимальные размеры оптических

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, v_torchigin@mail.ru

логических элементов ограничены длиной волны света, а размеры логических элементов с электрическими сигналами имеют перспективы значительного уменьшения. Этот вывод нашел подтверждение в настоящее время. Однако без оптических средств в виде рентгеновского излучения невозможно было создание современных электронных приборов с технологическими нормами, измеряемыми десятками и единицами нанометров.

Некоторые последствия программы «Оптический компьютер» невозможно было предвидеть, так как невозможно предугадать будущие открытия. При исследовании вопросов по реализации волнового мультиплексирования (wave-length division multiplexing, WDM) с использованием оптических резонаторов в виде миниатюрных стеклянных шариков был рассмотрен подход, при котором свет циркулирует внутри однородного стекла, где создает для себя сферический 2D-световод, показатель преломления в котором увеличен под действием этого же циркулирующего света.

Оказалось, что природа уже реализовала этот подход. Однако свет циркулирует не в однородном стекле, а в однородном воздухе. Циркулирующий свет в этом случае представляет собой шаровую молнию в атмосфере Земли [3]. Так появилась оптическая модель шаровой молнии. Однако необходимо было доказать, что она правильно описывает природу шаровой молнии, так как объекты, состоящие из света, никто ранее не упоминал, даже в самых необычных гипотезах. Академик П. Л. Капица изучал это явление и в конце своей жизни вынужден был признать, что этот плазменный орешек ему не по зубам. Кроме того, он предположил, что шаровые молнии принадлежат другому, неизвестному ему, миру. Он оказался прав. Дальнейшие исследования показали, что действительно существует другой мир, населенный объектами с аномальными свойствами. Причиной аномалий таких объектов служит циркулирующий в них свет [4, 5].

2 Физическая природа шаровой молнии

Как уже отмечалось, шаровая молния представляет собой свет, циркулирующий в атмосфере Земли. Это обычный белый свет, излучаемый линейной шаровой молнией, попавший в ловушку, которую он устроил себе из обычного воздуха. В конечном итоге эта ловушка превратилась в световой пузырь в виде тонкой сферической оболочки из сильно сжатого воздуха, в котором во всех возможных направлениях циркулирует белый свет. Такой пузырь светится белым светом, потому что циркулирующий свет рассеивается на флуктуациях плотности воздуха из-за хорошо известного явления молекулярного рассеяния света. В этом разделе дано полное объяснение физической природы шаровой молнии.

Для дальнейшего пояснения лишь укажем, что такой световой пузырь по своей конструкции напоминает мыльный пузырь с той лишь разницей, что мыльная пленка заменена пленкой сильно сжатого воздуха, в которой во всех направлениях циркулирует белый свет и сжимает воздух в пленке. Сферическая форма пленки

мыльного пузыря обеспечивается за счет избыточного давления воздуха внутри объема самого мыльного пузыря. Сферическая форма пленки светового пузыря обеспечивается центробежными силами, которые создает циркулирующий в ней свет. Давление воздуха внутри и вне пленки одинаково.

Таким образом, шаровая молния — это симбиоз воздуха и света. Циркулирующий свет сжимает воздух в сферической пленке. В свою очередь пленка предотвращает распространение света в свободное пространство, так как представляет собой 2D-световод, кривизна которого не равна нулю. На этом объяснение физической природы шаровой молнии можно считать завершенным.

В ведущих международных журналах по физике и оптике опубликовано более пяти десятков научных статей, где подробно объяснены все загадочные свойства природной шаровой молнии. Ссылки на статьи приведены в книгах [4, 5]. Было показано, что оптическая модель шаровой молнии в виде циркулирующего света обладает тем же набором парадоксальных и интригующих свойств, полученных на основе простых законов физики и оптики, изучаемых в средней школе, как и природные шаровые молнии, свойства которых известны из многочисленных свидетельств очевидцев. Можно сказать, что природные шаровые молнии — это экспериментальные образцы, созданные природой для проверки оптической модели шаровой молнии, а свидетельства многочисленных очевидцев — это отчет о проведенных проверках, который подтверждает справедливость оптической модели.

Таким образом, физическая природа шаровой молнии, которая оставалась нераскрытой в течение веков и относительно которой существуют сотни различных теорий и тысячи научных публикаций, была раскрыта случайно при исследовании совершенно других технических проблем.

Известен так называемый утиный тест: если что-то выглядит, как утка, плавает, как утка, крикает, как утка, то, вероятно, это и есть утка. Свойства шаровой молнии (утки) хорошо известны из накопленных за столетия свидетельств многих очевидцев. Ни одна из многочисленных теорий не может предложить объект с такими же свойствами, какие наблюдаются у естественных шаровых молний. Оптическая модель шаровой молнии проходит указанный выше утиный тест. Действительно, оптическая модель представляет циркулирующий свет, который выглядит, как шаровая молния, имеет такие же свойства, как шаровая молния, ведет себя в атмосфере Земли, как шаровая молния, вероятно, такая оптическая модель соответствует природе шаровой молнии.

Отметим, что сама шаровая молния помогает пройти этот тест, поскольку набор свойств природной шаровой молнии уникален и отсутствуют другие объекты с таким набором свойств. Такие свойства отсутствуют у всех известных объектов, состоящих из частиц.

3 Стабильность шаровой молнии

Большинство исследователей шаровой молнии возражают против приведенной модели шаровой молнии, поскольку, с их точки зрения, циркулирующий

свет не может существовать в природе. Действительно, сжатый воздух всегда имеет тенденцию расширяться. Любой свет имеет тенденцию распространяться по прямой. Следовательно, такой циркулирующий свет должен быть неустойчив.

Остается вопрос: как объяснить стабильность циркулирующего света? Вообще говоря, это проблема для физиков-теоретиков. Однако в течение полутора десятка лет таковых не нашлось. Чтобы ответить на этот вопрос, знаний одной только оптики недостаточно. Требуется дополнительные знания из таких областей физики, как электродинамика, механика, общая физика и теория устойчивости. При изучении состояния науки в этих областях выяснилось, что ситуацию нельзя считать удовлетворительной. До сих пор продолжаются споры о величине импульса света в оптической среде. Нет единого мнения не только о величине импульса, но и о том, увеличивается или уменьшается величина этого импульса по сравнению с импульсом света в свободном пространстве. Без обоснованных знаний о величине импульса света в оптической среде дальнейшие исследования механических свойств света невозможны, так как силы, действующие на свет, зависят от величины этого импульса.

Была проведена серия различных мысленных экспериментов, в которых использовались только общепринятые законы физики и оптики. Все эти эксперименты дали однозначный результат: импульс света в оптической среде увеличивается в n раз, где n — показатель преломления этой среды [6]. Были получены и другие результаты, не связанные напрямую с циркулирующим светом.

Кроме того, было показано, что сам термин «электрострикционное давление» не применим при сжатии воздуха циркулирующим светом. В поле электромагнитной волны возникновение давления обеспечивается не только электрическим полем волны, но и ее магнитным полем. Поскольку за счет этого явления происходит сжатие воздуха в тонкой сферической пленке сильно сжатого воздуха, термин электрострикционное давление не полностью отражает физику явления.

Анализ необходимых условий устойчивости циркулирующего света проводился на основе общепринятого подхода, согласно которому полная энергия системы должна иметь минимум [7, 8]. В рассматриваемом случае энергия шаровой молнии состоит из энергии сжатого газа и энергии циркулирующего света. По мере увеличения радиуса циркулирующего света энергия сжатого воздуха всегда уменьшается. Тогда из условия существования минимума общей энергии, энергия циркулирующего света должна увеличиться. Показано, что это имеет место только в том случае, если свет циркулирует в среде с показателем преломления, существенно отличающимся от единицы. Это требование выполняется в том случае, когда молекулы сжатого воздуха плотно упакованы и его плотность сравнима с плотностью воды [9].

Полученный вывод подтверждается также необычно большим временем жизни циркулирующего света, которое на три порядка превосходит время жизни солнечного света в атмосфере Земли. Это объясняется тем, что при плотной

упаковке молекул уменьшаются флуктуации плотности воздуха, которые ответственны за явление молекулярного рассеяния света, определяющее время жизни света в прозрачной оптической среде.

Таким образом, анализ устойчивости циркулирующего света позволил не только уточнить знания о физических явлениях, ответственных за устойчивость шаровой молнии, но и определить ее уникальные физические параметры.

4 Заключение

Анализ в рамках программы «Оптический компьютер» чисто технических вопросов возможности улучшения свойств оптических резонаторов, используемых при передаче посредством WDM оптических сигналов, привел к открытию совершенно нового мира циркулирующего света, населенного объектами с аномальными свойствами.

Предположение о том, что свет может циркулировать в однородной оптической среде, оправдалось самым неожиданным образом. Оказалось, что это явление уже существует в природе и представляет собой шаровую молнию. Шаровая молния совершенно не то, что предполагалось даже в самых необузданных фантазиях. Свойства шаровой молнии настолько необычны, что до настоящего времени никто не мог вообразить, что может существовать объект с такими свойствами. В многочисленных статьях, опубликованных с 2003 г., показано, что поведение оптической модели шаровой молнии полностью совпадает с поведением природных шаровых молний, которые могут рассматриваться как экспериментальные образцы оптической модели, свойства которых зафиксированы в многочисленных свидетельствах очевидцев.

При анализе свойств оптической модели шаровой молнии были уточнены современные представления о величине момента света в оптической среде, о механизмах возникновения давления, создаваемого светом в газах, об особенностях взаимодействия света с оптической средой. Эти уточнения касаются не только рассматриваемых проблем, а имеют всеобщий характер.

Из смысла названия Российской академии наук следует, что эта академия должна быть ориентирована на научные исследования. Как отмечал П. Л. Капица, наука — это исследование неизвестного. Все остальное — это технический прогресс. Открытие и исследование природы шаровой молнии относятся к области науки и стало очередным шагом в познании природы, хотя и состоялись при изучении чисто технической проблемы.

Литература

1. Соколов И. А., Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г. и др. Самосинхронный конвейер с переменным числом ступеней // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 1. С. 4–13. doi: 10.14357/08696527230101. EDN: FVYPZG.

2. *Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Степченко Д. Ю. и др.* Мультиплексируемый самосинхронный конвейер // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 2. С. 4–12. doi: 10.14357/08696527230201.
3. *Торчигин В. П.* О природе шаровой молнии // Докл. Акад. наук, 2003. Т. 389. № 1. С. 41–44. EDN: OPNBMJ.
4. *Torchigin V. P.* The world of circulation light where ball lightnings live. — New York, NY, USA: Nova Science Publs., Inc., 2022. 244 p. doi: 10.52305/OMGV4259.
5. *Torchigin V. P., Torchigin A. V.* Ball lightning as a messenger from a new world of circulating light. — London: Cambridge Scholar Publishing, 2023. 183 p.
6. *Torchigin V. P.* Dozen arguments in favor of the Minkowski form of the momentum of light in matter // Optik, 2020. Vol. 218. Art. 164986. 15 p. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.164986.
7. *Torchigin V. P.* Physical and optical laws responsible for existence and abnormal behavior of ball lightning // Optik, 2020. Vol. 222. Art. 165374. 9 p. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165374.
8. *Torchigin V. P.* Steady states and stability of the circulating light in the air atmosphere // Optik, 2021. Vol. 235. Art. 166635. 12 p. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.166635.
9. *Torchigin V. P.* Parameters of natural ball lightning derived from its optical model // Optik, 2021. Vol. 243. Art. 167390. 5 p. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167390.

Поступила в редакцию 29.07.24

THE RAS PROGRAM “OPTICAL COMPUTER” AND ITS CONSEQUENCES

V. P. Torchigin

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: Within the framework of the RAS program “Optical Computer” during the study of the possibility of creating optical resonators in which a light wave circulates in homogeneous glass, it was found that such a possibility has already been realized in the form of ball lightning in the Earth’s atmosphere. As a result, an optical model of ball lightning appeared according to which ball lightning is simply circulating light, that is, an object whose existence is difficult to believe without additional convincing evidence. Such evidence was obtained. Numerous articles have shown the complete similarity of the anomalous behavior of natural ball lightning, which is based on many years of numerous eyewitness accounts, with the behavior of circulating light in the atmosphere, which follows from the simple laws of physics and optics. Moreover, it turned out that in nature, there is a whole world of circulating light consisting of objects with anomalous properties. This made it possible to explain another no less mysterious phenomenon of single-bubble sonoluminescence. Two books on this topic have been published in New York and London. Thus, the consequence of the Optical Computer program was the discovery of a new world of circulating light with unusual objects that may be in demand in computing technology.

Keywords: optical signal transmission; ball lightning; circulating light; molecular light scattering; 2D lightguide

DOI: 10.14357/08696527240409

EDN: NALXDG

References

1. Sokolov, I. A., Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, *et al.* 2023. Samosinkhronnyy konveyer s peremennym chislom stupeney [Self-timed pipeline with variable stage number]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(1):4–13. doi: 10.14357/08696527230101. EDN: FVYPZG.
2. Stepchenkov, Yu. A., Yu. G. Diachenko, D. Yu. Stepchenkov, *et al.* 2023. Mul'ti-pleksiruemyy samosinkhronnyy konveyer [Multiplexed selftimed pipeline]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(2):4–12. doi: 10.14357/08696527230201.
3. Torchigin, V. P. 2003. On the nature of ball lightning. *Dokl. Phys.* 48(3):108–111. doi: 10.1134/1.1565612. EDN: LIAZEB.
4. Torchigin, V. P. 2022. *The world of circulation light where ball lightnings live*. New York, NY: Nova Science Publs., Inc. 244 p. doi: 10.52305/OMGV4259.
5. Torchigin, V. P., and A. V. Torchigin. 2023. *Ball lightning as a messenger from a new world of circulating light*. London: Cambridge Scholar Publishing. 183 p.
6. Torchigin, V. P. 2020. Dozen arguments in favor of the Minkowski form of the momentum of light in matter. *Optik* 218:164986. 15 p. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.164986.
7. Torchigin, V. P. 2020. Physical and optical laws responsible for existence and abnormal behavior of ball lightning. *Optik* 222:165374. 9 p. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165374.
8. Torchigin, V. P. 2021. Steady states and stability of the circulating light in the air atmosphere. *Optik* 235:166635. 12 p. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.166635.
9. Torchigin, V. P. 2021. Parameters of natural ball lightning derived from its optical model. *Optik* 243:167390. 5 p. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167390.

Received July 29, 2024

Contributor

Torchigin Vladimir P. (b. 1938) — Doctor of Science in technology, professor, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; v_torchigin@mail.ru

ON AN APPROACH TO DATA ANALYSIS AND VISUALIZATION IN THE DOMAIN OF EMPLOYEE–ORGANIZATION RELATIONSHIPS*

Kishankumar Bhimani¹ and Khushbu Saradva¹

Abstract: An increasing number of domains in science and industry rely on the intensive use of data. In such domains, obtaining new knowledge is almost impossible without the use of modern methods of data analysis and visualization. A typical example is the domain of human resource (HR) management. This paper proposes an approach to the application of exploratory data analysis, feature extraction from data, and predictive analytics to determine the relationships between an employee and an organization. Correlation analysis is used to identify relationships between data attributes and assess the strength of these dependencies. Word clouds and conditional feature selection are used during feature extraction. A feature that corresponds to the risk of an employee leaving the organization is implemented. The approach is applied on a nationwide dataset of organization's employee survey and contributes to computer science methods in sociology and HR management.

Keywords: data analysis; data visualization; human resource management; employee–organization relationship

DOI: 10.14357/08696527240410

EDN: OMTEED

1 Introduction

The comprehension of workplace dynamics [1] is an area of study that has gathered significant attention, given its intricate connection with organizational success. This comprehension, which involves understanding the complexities of employee behaviors and their conjunction with organizational elements, is critical to fostering a conducive and productive work environment.

This paper delves into a comprehensive analysis of the workplace, employing data science methodologies and visualization techniques to a dataset gleaned from a large employee survey. We have undertaken this study with a keen interest in understanding the multifaceted relationship between employees and their organization. We focus on several key facets including employee satisfaction, their engagement levels, work environment conditions, demographic analysis, and, more critically,

*The paper is published on the proposal of the Program Committee of the 25th International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2023).

¹National Research University Higher School of Economics, 11 Pokrovsky Blvd., Moscow 109028, Russian Federation

burnout prediction. This multifocal approach enables a holistic understanding of the work-place, thereby furnishing actionable insights.

Additionally, we aim at filling some gaps between complex data science methods and their practical application in understanding employee–organization dynamics. The analysis is presented in an accessible manner, thereby enabling individuals even with limited programming or data science knowledge to comprehend the insights derived.

Throughout the paper, we strive to contribute to the broader dialogue on employee–organization relationships (EOR) and the various elements influencing it. We are hopeful that our research will serve as a valuable key for various stakeholders, including HR professionals, organizational leaders, researchers, and employees alike. We believe that the insights derived from our analysis can catalyze effective decision-making processes and lead to the development of healthier, more productive workplaces.

2 Related Works

For decades, scholars specializing in organizational behavior have dedicated themselves to a deeper understanding of the relationship between employees and their respective organizations [2]. The EOR has steadily emerged as a central area of study for experts in organizational behavior, HR management, and industrial relations [3]. Existing literature comprehensively explores the EOR from both the individual perspective and at group and organizational levels of analysis [4].

The EOR has entrenched itself in the academic discourse, seeking to underpin the theoretical groundwork essential for comprehending the mutual exchange from both employer and employee standpoints. The relationship between employee performance and employer benefits represents a multifaceted dynamic [5]. There exists a mutual commitment to improvement on both ends of this spectrum, which can be stimulated through various forms of analysis. Numerous methodologies, approaches, and publications provide substantial literature in this domain. They address key areas such as the EOR, employee satisfaction, burnout, workspace environment, and the consequential link between employee engagement and organizational performance [6].

The paper by Frye *et al.* [7] underscores the significant financial and operational costs associated with employee attrition. Their research highlights the importance of predictive models, such as logistic regression, in understanding and preventing employee quits. This study aligns with a growing body of literature emphasizing the need to address employee attrition and burnout for organizational success. Brewer and Shapard's [8] study conducts a metaanalysis on the connection between employee burnout and factors like age and experience. It underscores the practical significance of understanding this relationship for effective burnout interventions. The literature review emphasizes the harmful impact of burnout on individuals and organizations and the need to address these research findings to guide HR professionals in addressing burnout effectively.

Nair *et al.* [9] paper underscores the indispensable role of data visualization in predictive analytics highlighting how visual analytics, in tandem with various Data Science tools, bridges the gap between raw data and actionable insights of business intelligence. This method is the key to expand this to real employee survey visual analytics.

This body of literature acts as a comprehensive resource for understanding the nuances and dynamics of the EOR facilitating the formulation of effective strategies for mutual growth and satisfaction. Here, data science could lead this field by analysis and visualization [10] because it covers wide range of solution for all sectors. The contemporary workplace is undergoing significant transformations driven by technological advancements, changing demographics, and evolving employee expectations. Organizations are increasingly recognizing the importance of employee opinion and engagement (EOE) to ensure their success and sustainability. In this context, the application of data science techniques and visualization tools to analyze employee survey data presents a valuable opportunity for organizations to gain insights into employee perceptions, sentiments, and engagement levels. This literature review aims to explore existing research on the intersection of workplace analysis, EOE, data science methodologies, and visualization techniques.

3 Data

This paper aims to elaborate on the dynamics of today's workplaces through the application of advanced data science techniques. The backbone of this extensive analysis rests on a meticulously collected, broad-ranging data set procured from a nationwide employee survey.

This data set, sourced through a paid acquisition rather than open-source means, gives an inclusive view of the current situation, encompassing all industry sectors and employee roles. The data size is substantial, originally composed of 18,976 entries with 82 attributes each. However, through a process of cleaning and removal of duplicate entries, this raw dataset was streamlined to 18,972 unique records with 80 attributes, further enhancing the potential for precise insights. Since the information predominantly consists of survey responses, it necessitated rigorous information wrangling and use of filtering methods to streamline it for significant interpretation and analysis [11].

To ensure transparency and to support reproducibility in future research, we will facilitate access to a sample copy of our dataset in a secure manner. It protects the privacy of research participants and aims to help other researchers validate our methods and results while adhering to data protection standards. The aim of sharing these sample data is to foster a collaborative, transparent research environment that would encourage further explorations in this domain.

3.1 Data collection

The data used in this paper is accurately acquired from employee survey-based company from a specific country. The motivation behind this collection strategy was

to build a comprehensive model to elucidate workplace dynamics for both employees and organizations. To ensure the reliability and accuracy of our data, we opted to source this large dataset from a reputable organization specializing in high-quality, precision data surveys.

Data collection structure is described in detail in Table 1 which is available at: https://github.com/MrBhimani/Employee_Survey_Analysis/blob/main/Dataset/Dataset.xlsx. The table represents the raw data from the employee survey where the headers define the questions tag and the responses are recorded in subsequent rows of the dataframe. This layout provides a clear and systematic view of the data for an effective understanding to learners. Also, full dataset is freely open access for users at GitHub: https://github.com/MrBhimani/Employee_Survey_Analysis/blob/main/Dataset/Dataset.xlsx.

3.2 Data preprocessing

Preprocessing the collected data is a key to ensuring its readiness for analysis [12]. The following methods were systematically used for this purpose.

- the initial data headers contained redundant tags, i. e., `<br>` that could complicate analysis. We rectified this by transforming these tags into simplified dataframe columns, thereby enhancing the clarity of the dataset;
- handling missing value [13] and steamlining data;
- responses to several survey questions were taken on a five-point scale: ‘*Agree*,’ ‘*Rather agree than disagree*,’ ‘*Disagree rather than agree*,’ ‘*Disagree*,’ and ‘*Difficult to answer*.’ We numbered these responses, mapping them to the values 1, 2, 3, 4, and 5, respectively, for bidirectional conversion;
- we applied label encoding, scaling, and various other transformations during the programming phase to ensure standardization and reliability of the dataset;
- a range of data science techniques were applied to further prepare the dataframe. These included methods for data mapping, transformation, and others, all de-signed to enhance the usability of the dataset; and
- in preparation for text processing tasks such as word cloud creation, we performed stop word removal using the NLTK (National Language Toolkit) library. Stop words, which are commonly occurring words of minimal significance (e. g., ‘a,’ ‘an,’ ‘the,’ ‘are’), were removed to focus the text analysis on meaningful content.

Through these comprehensive preprocessing steps, we were able to refine our dataset, increasing its suitability for a thorough and accurate workplace analysis.

4 Methodology

This methodology seeks to address an innovative approach to understand and navigate the complexities of employee surveys and workplace analytics — a challenge faced

by numerous organizations in their quest for customized insights. We have given special consideration to visual interpretation by applying modern data science methodologies, facilitating an intuitive understanding of the analyses presented.

Our approach is designed to be accessible not only to those experienced in programming and data science but also to individuals who might be beginners in these domains. We provide ready-to-use code promoting wider adoption of the methods introduced.

The insights gained from the employee–organization dynamic are of vital importance to a range of areas, including Management, Economics, Sociology, and HR. These sectors can leverage our visually rich approach to glean new insights, potentially enhancing their understanding of their domains and enriching future publications. In this section, we will describe our methodology, which comprises of three main stages: Exploratory Data Analysis (EDA), Feature Engineering, and Predictive Analysis.

4.1 Exploratory data analysis

Any survey-based research must begin with EDA [14], which offers an excellent way to fully understand data patterns and linkages. By engaging in EDA, we can conduct statistical analysis, identify correlations, spot missing data, detect outliers, and determine the central tendency of the dataframe. These steps collectively permit us to find insightful patterns and informative visualizations.

The EDA graphs, in their simplicity and expressiveness, provide a practical and effective means to represent the underlying data. Exploratory data analysis equips the researcher to discover the data’s inherent structure by uncovering new insights. In this study, the broad objectives of EDA are to enhance our understanding of the survey responses, identify patterns within the data, and build easy to understand for audience.

Applied to our context, EDA plays a pivotal role in gaining insights into employee satisfaction and engagement, organizational work culture, happiness indices, benefits offered, the company’s value to its employees, and demographic factors. The use of EDA in our methodology ensures that we capitalize on the richness of our dataset, uncovering nuanced information for our further analyses and discussions.

Correlation analysis: Correlation analysis is a vital aspect of EDA for understanding relationships between variables and quantifying their strength. In Fig. 1, we present a correlation analysis of 60 key questions from Table 1, focusing on response-based categorical data.

In Figs. 1a and 1d, we observe normal distributions, indicating a balanced relationship between these categories. However, Figs. 1b and 1e show skewed distributions suggesting an asymmetry in the relationships. Figure 1c displays a symmetric distribution indicating a different pattern altogether. Figure 1f is a correlation histogram, filled with p-values. Notably, this histogram displays aligned foundation to further analysis.

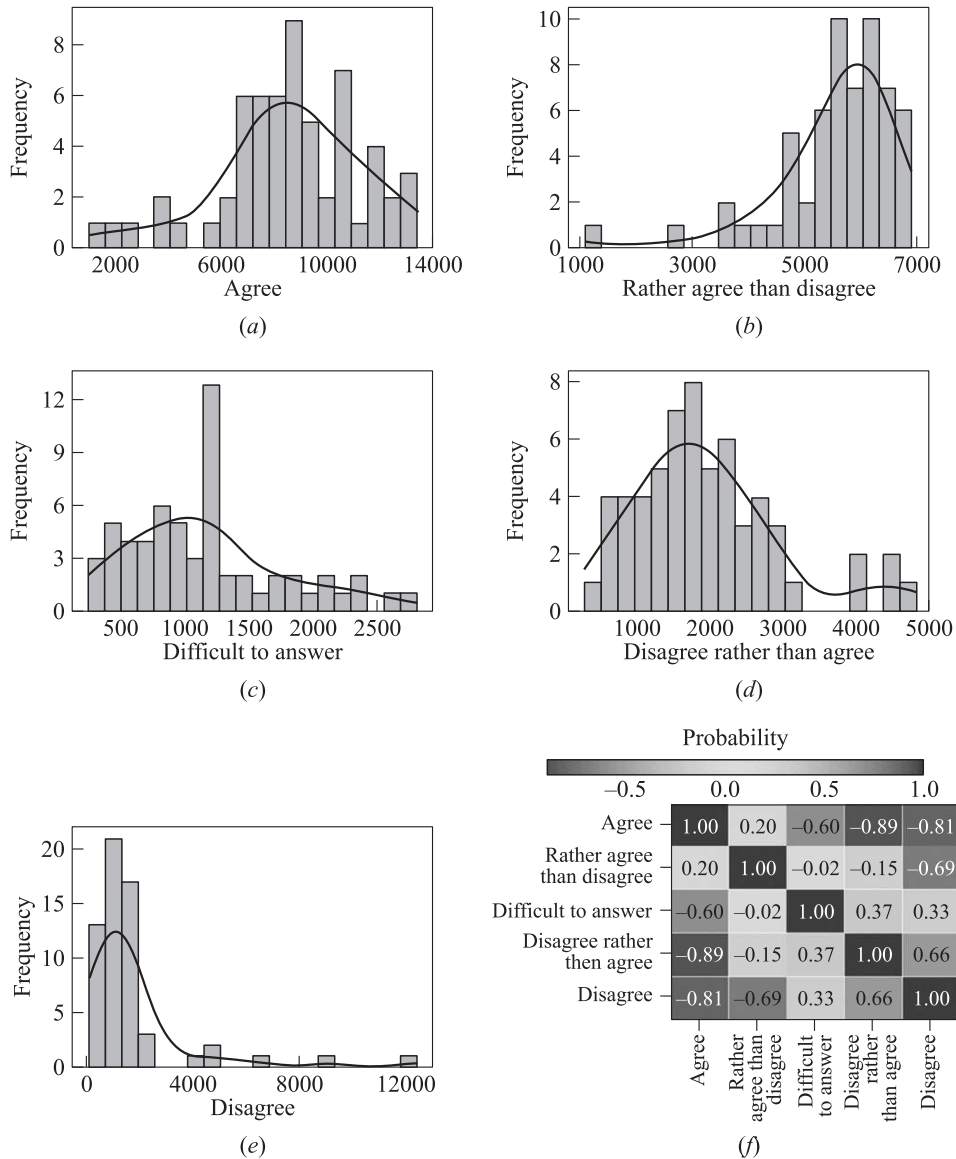


Figure 1 Correlation analysis of response-based categorical data (a)–(e) and heatmap of correlation with p-value (f)

4.2 Feature engineering

In many instances, datasets, including those derived from questionnaires, articles, reviews, and surveys, contain text fields that can serve as rich sources of information.

Feature engineering is the process through which these raw data elements are carefully selected, manipulated, and transformed into more meaningful attributes or “features.” These features, which can be quantified inputs in a predictive model, often significantly enhance the quality and accuracy of the resulting analysis [15].

A key strength of feature engineering is its role as a springboard to predictive analysis, enabling the application of Machine Learning (ML), Deep Learning (DL), and Natural Language Processing (NLP) techniques [16]. From Table 1, questions 71 and 72 allow employees to express their perceptions freely. The NLP techniques are pivotal in understanding individual sentiments. In Fig. 8, a commonly used Word Cloud approach will be illustrated. Researchers can further enrich these categorical data by employing NLP algorithms for text classification [17] such as Word2Vec, Glove, TF-IDF, Bag-of-Words, and Embedding Algorithms [18]. It can provide a predictive perspective, facilitating the forecasting and estimating of future outcomes.

The journey of feature engineering starts with data preprocessing and cleaning. We employ standard techniques such as data imputation for missing values [13] using algorithms like mean imputation, median imputation, or advanced techniques like K-nearest neighbors (KNN) imputation. Very few Outliers are identified and addressed using methods such as IQR (Interquartile Range) based detection [19].

Feature engineering can aid in interpreting survey trends and directing predictive analyses in the context of employee surveys. For instance, the replies “*Agree*,” “*Rather agree than disagree*,” “*Disagree rather than agree*,” “*Difficult to answer*,” and “*Agree*” on the five-point scale were converted into numerical features using mapping [20]. Now, we have numerical values representing each response and we can create features based on the survey questions. For example, let us say we have a survey question like “I am satisfied with my job.” We can create a feature called “*Job Satisfaction*” and assign it the numerical values corresponding to the responses of each employee. These features, mapped against variables such as age, gender, industry, position, and region of work, allowed us to explore and identify patterns more effectively.

4.3 Predictive Analytics

Predictive analytics encompasses a range of business intelligence technologies (IT) de-signed to identify patterns and relationships within large datasets, enabling the prediction of future behaviors and events. In the context of our study, predictive analytics offers significant value by forecasting potential employee attrition. This insight can guide organizations to enhance their employee satisfaction, happiness, and benefits programs proactively, mitigating potential turnover [21].

Ponnuru *et al.* [22] present ML algorithms, specifically Logistic Regression, on IBM HR data to predict and address employee attrition for only software industry. Najafi-Zangeneh *et al.* [23] use an ML framework with a “max-out” feature selection method to predict employee attrition and assess model stability using an IBM HR

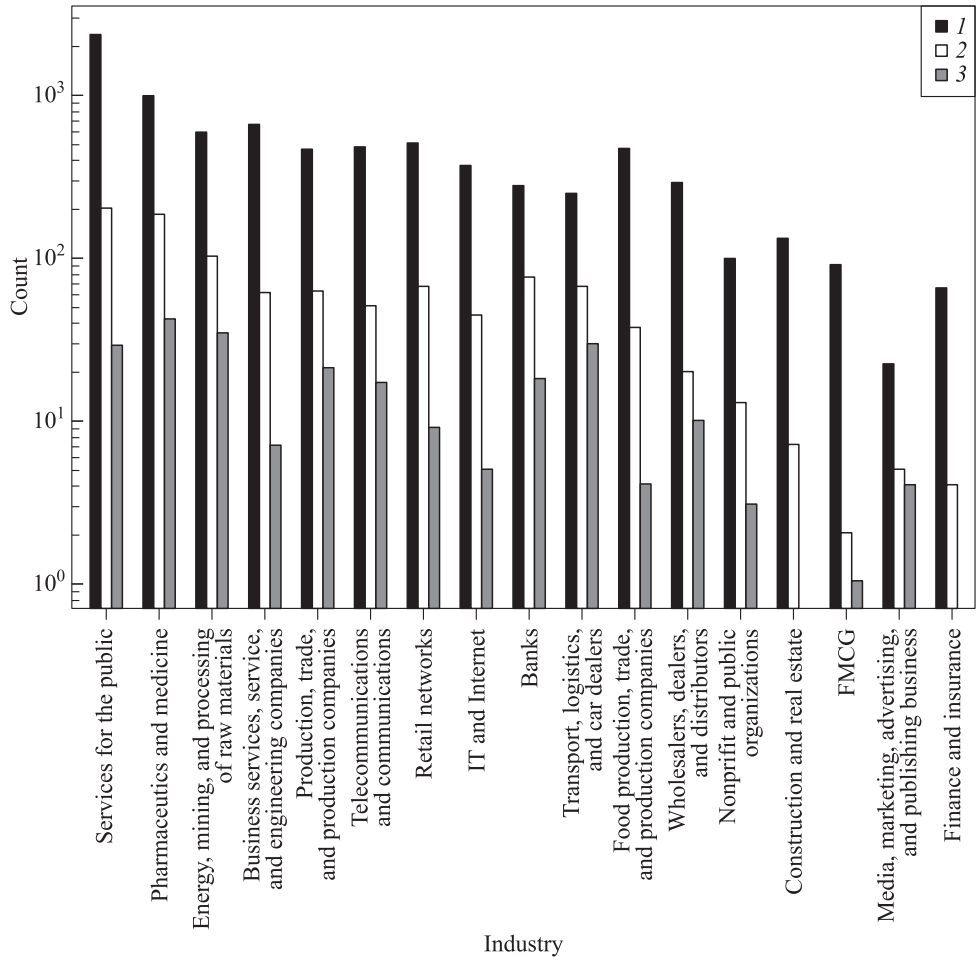


Figure 2 Industry-wise comparison of satisfaction (1), burnout (2), and employee attrition score (3)

dataset, Srivastava and Nair [24] utilize predictive analytics to forecast and mitigate employee attrition by analyzing past data to predict future voluntary terminations.

In the realm of predictive analytics, we have established three vital components to gauge attrition score calculation as shown in Fig. 2. Firstly, we measure Employee Satisfaction (1) by tallying the “Agree” responses in the industry sector, directly extracted from Question 28 in the data from Table 1. Secondly, we pinpoint Employee Burnout (2) by identifying the column with the highest count of “Disagree” responses for Question 49 and calculating the “Agree” responses within it. This metric indicates employees considering leaving within the next

year. Thirdly, our custom-developed Employee Attrition score (3), created through condition-based programming, assesses the risk of employees leaving. This score takes into account responses from both Questions, capturing instances where employees express a desire to leave alongside dissatisfaction. These components collectively provide a comprehensive understanding of potential burnout and attrition risks within the organization.

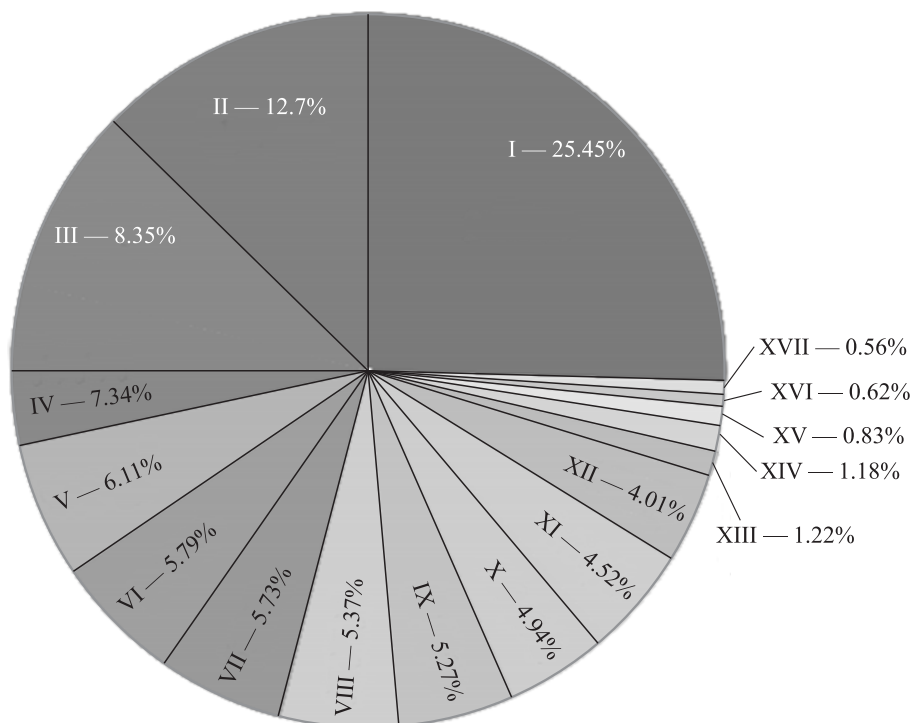


Figure 3 A Pie chart visualizing distribution of employees across various industry sectors: I — services for the public (4829 employees); II — pharmaceuticals and medicine (2410 employees); III — energy, mining, and processing of raw materials (1585 employees); IV — business services, service, and engineering companies (1392 employees); V — production, trade, and production companies (1160 employees); VI — telecommunications and communications (1099 employees); VII — retail networks (1087 employees); VIII — IT and Internet (1018 employees); IX — banks (1000 employees); X — transport, logistics, and car dealers (937 employees); XI — food production, trade, and production companies (858 employees); XII — wholesalers, dealers, and distributors (761 employees); XIII — nonprofit and public organizations (232 employees); XIV — construction and real estate (223 employees); XV — FMCG (157 employees); XVI — media, marketing, advertising, and publishing business (117 employees); and XVII — finance and insurance (107 employees)

5 Results

5.1 Demographic analysis and visualization

In these findings, the demographic analysis plays a significant role, given the multiple features available for exploration and visualization within the dataset.

Figure 3 presents a pie chart representing the number of employees across different industry sectors. Each sector’s percentage and total employee count are clearly displayed, providing a comprehensive view of employee distribution across these industry segments. The legend lists all industry sectors included in the dataset.

The primary objective of this visualization is to provide a clear and concise overview of how employees are distributed across various industry sectors. A pie chart is particularly well-suited for this purpose as it allows for a quick and intuitive comparison of the percentage count of employees working within each industry sector relative to the total workforce. Consequently, it facilitates a rapid assessment of the industry sectors with the highest and lowest proportions of employees, a key aspect of our analysis in understanding the workforce landscape.

Figure 4 demonstrates a bar chart illustrating the distribution of employees across various age ranges. The *X*-axis lists age group categories while the *Y*-axis reflects

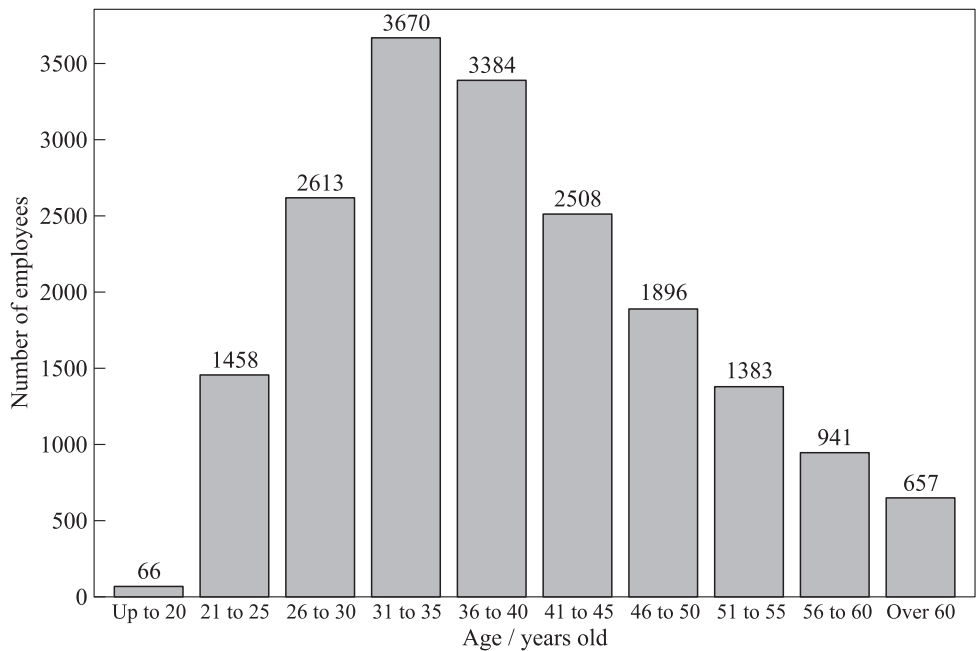


Figure 4 Employee age range distribution with total count

the corresponding employee counts. This visualization sheds valuable insights into the age demographics of the workforce, shedding light on the proportion of younger vs. older employees across sectors.

The objective of this visualization is to provide an overview of how the employee population is distributed across various age groups. A bar chart is particularly well-suited for this purpose because it excels in showing comparisons among discrete categories, such as different age ranges, on the *X*-axis. The *Y*-axis, on the other hand, is utilized to represent the count of employees within each age category. Its capacity to clearly depict the relationship between age categories and employee count enhances the interpretability for highlighting any trends or disparities in the age composition of the workforce, aiding in the assessment of age-related workforce characteristics.

A correlation map in a form of heatmap is shown in Fig. 5. It connects various age groups to different industry sectors. With age ranges on the *X*-axis and industry sectors on the *Y*-axis, the color-coded representation, ranging from 0 to 700, allows for a detailed examination of the workforce distribution. The heatmap is an ideal choice for this representation due to its ability to highlight patterns and variations across two categorical variables — age groups on the *X*-axis and various industry sectors on the *Y*-axis. This visualization method facilitates the quick identification of trends, revealing how age demographics vary across different sectors. For instance,

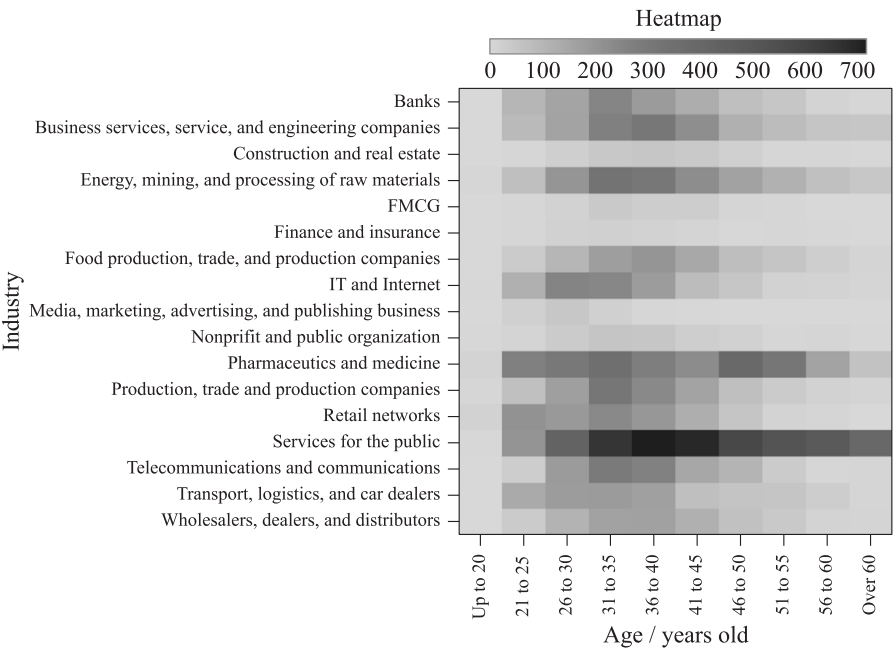


Figure 5 Heatmap of age ranges vs. industry sectors with workforce color-coded counts

the heatmap shows that there are more employees in the Public Services sector in the age ranges of 31 to 35, 36 to 40, and 41 to 45, compared to Fast-Moving Consumer Goods (FMCG), or Finance and Insurance, which has lower employees count overall.

5.2 Work satisfaction and engagement

Understanding employee satisfaction and engagement within their current workplaces is a crucial aspect of our research. To assess this, we selected several pertinent questions from the survey (namely, Questions 12, 14, 15, 17–19, 30, 31, 34, and 37 from Table 1). Each of these questions targets specific aspects related to work satisfaction and engagement, with employees’ interest in their work, their perception of their abilities, their satisfaction with their salary, their perceived value to the company, and their opinion on the company’s appraisal methods [25].

While frequency plots for each question can yield important insights, we have chosen violin plots for their ability to clearly delineate the distribution of responses across multiple categories.

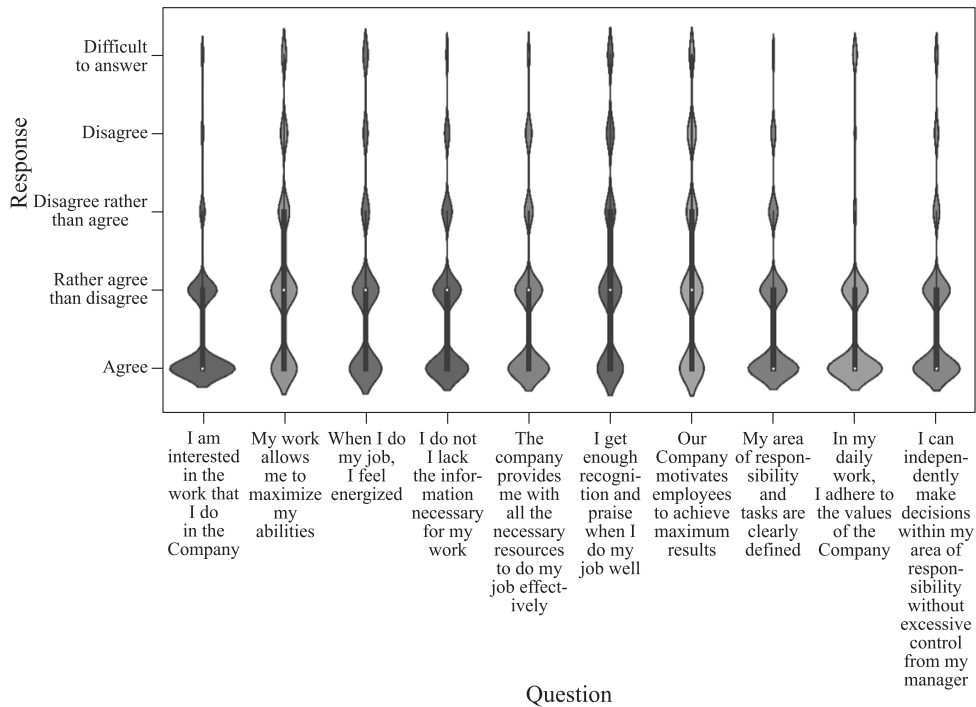


Figure 6 Violin plot showing response distribution of each question in work satisfaction

This violin plot is shown in Fig. 6, with each question tag on the X -axis and the corresponding responses on the Y -axis. The resulting visualization provides a clear picture of the response distribution for each question. Violin plots are a well-suited choice for this task as they excel in revealing the distribution of responses across various categories, making them particularly effective for survey data. The violin plots offer a clear and intuitive representation, distinctly illustrating that the majority of responses cluster around ‘Agree’ and ‘Rather agree than disagree,’ with a narrowing of the plots for the remaining response categories. This graph allows one to gauge general work satisfaction and engagement trends across the surveyed employees.

5.3 Work environment analysis

A comprehensive work environment analysis involves evaluating a variety of aspects [26]. We have selected several survey questions (specifically, Questions 13, 15, 29, 42, 45, 60, 63, and 65 from Table 1), revolving around factors such as organized work culture, provided benefits, opportunities for advancement, comfort

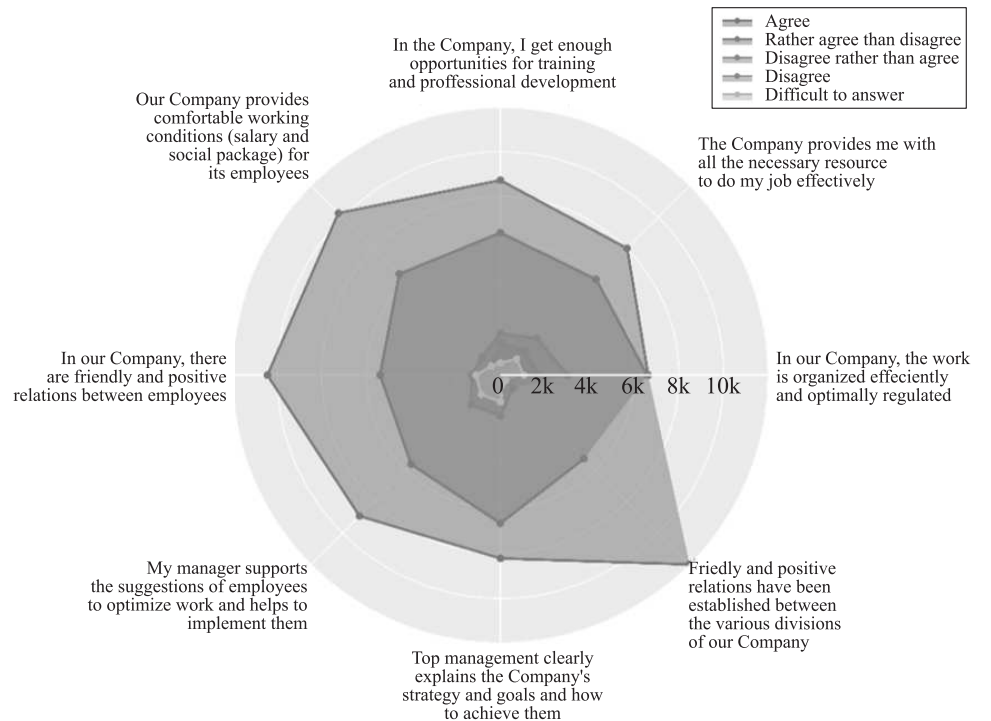


Figure 7 Radar plot illustrating frequency of responses to work environment related questions

at the workplace, and relationships with managers, and camaraderie with teammates, among others. The results are presented using radar plot. Radar plot has its unique capability to effectively assess response density and patterns in work environment-related questions. This plot excels in this context due to its ability to simultaneously represent multiple response categories in a single plot, each differentiated by a distinct color.

This visualization choice offers a perfect view of response frequencies for specific questions, aiding in the precise evaluation of work environment factors by capturing density and distribution patterns. Hence, a radar plot presents the most compelling and comprehensive visualization for response analysis. In Fig. 7, the spider graph within the radar plot illustrates the total count of responses, ranging from 'Agree' to 'Disagree,' each represented by a distinct color. The perimeter of the radar plot displays the corresponding questions, while the legend accurately depicts the response categories. This graphical representation facilitates a clear understanding of the survey responses related to work environment factors.

5.4 Word cloud analysis

A word cloud provides a striking visual representation of textual data, with words that appear more frequently in a source text given greater prominence. In Fig. 8, we have created two distinct word clouds A & B, focusing on Questions 71 and 72 from the survey, which respectively address 'What makes our company a good employer?' and 'What could be improved in the work/processes in the company?'

In addition, to uncover common themes between the responses to these two questions, we utilized a Venn diagram approach, depicted in Fig. 8c. This diagram presents overlapping categories between the two word clouds, helping to identify key areas that can mutually enhance both the employee experience and company processes. Interestingly, the terms 'salary,' 'team,' 'training,' 'staff,' 'responsibility,' 'work,' 'time,' 'organization,' 'management,' and 'company' emerge as common elements in both contexts. These words suggest focal points for both parties to work on and improve, enhancing the overall work environment and organizational processes.

Word clouds are ideal for this purpose as they highlight the most frequently occurring terms, providing a quick and intuitive overview of the survey's textual responses. Their significance in employee surveys extends beyond this study as they not only aid in current analysis but also open avenues for future research, particularly, for NLP enthusiasts, by offering rich insights into employee sentiment and areas of concern.

5.5 Burnout prediction

Burnout is a state of emotional, mental, and often physical exhaustion brought on by prolonged or repeated stress by any mean. High levels of burnout can also

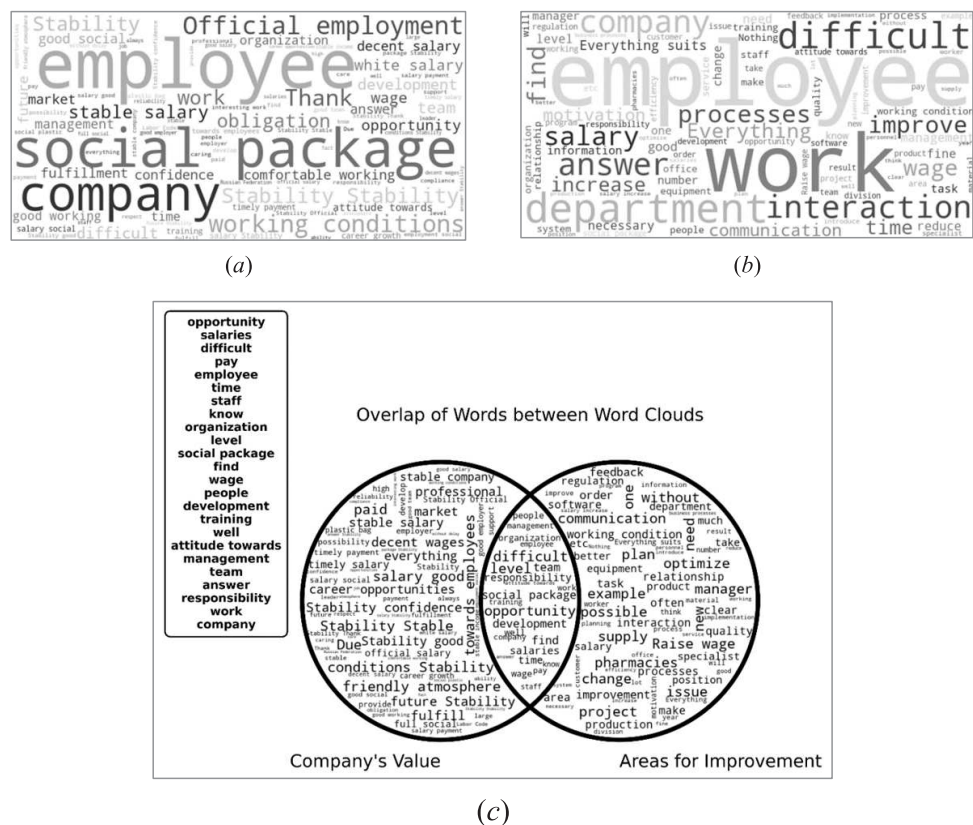


Figure 8 Word clouds for employer attractiveness words (a), suggested areas for company's improvement (b), and a Venn diagram identifying overlapping terminology (c)

drive employees to consider leaving their current organization [27]. In survey, Questions 28 and 49 from Table 1 specifically probe the burnout levels among individual employees.

Figure 2 breaks down key aspects of employee engagement in various sectors. It uses three components: Employee Satisfaction (1), Employee Burnout (2), and Employee Attrition (3). Employee Satisfaction is determined by counting “Agree” responses in Question 28, indicating the level of satisfaction. Employee Burnout is identified by counting “Agree” responses in Question 49, indicating an intention to leave within a year. Employee Attrition score is calculated using custom algorithm that link responses from both Questions, helping us accurately estimate potential burnout and attrition risk among employees. Figure 2 provides a clear snapshot of these critical factors in employee engagement across different sectors.

Bar charts are ideal for this purpose as they distinctly represent the count of such employees in each industry, providing a clear visual of burnout likelihood with satisfaction and also, underscoring their importance in quantifying and visualizing employee attrition score estimation, making them a precise choice.

6 Concluding Remarks, Discussion, and Future Research

This research stands as a testament to the profound implications of data science across various management sectors [28], particularly, within the realm of EOR. Through using these approaches, one can enhance their findings. This broad-based approach is designed to resonate with a diverse array of readers — from researchers in sociology and management to firms seeking a detailed understanding of their workforce's satisfaction.

By leveraging a comprehensive dataset from a nationwide employee survey, we have delved deep into the multifaceted dynamics of the workplace, shedding light on critical aspects such as employee satisfaction, engagement levels, work environment conditions, demographic analysis, and the often-overlooked issue of burnout prediction. Our approach in the realm of burnout research sets us apart. Rather than focusing solely on employee attrition scores, we have developed an algorithm that simultaneously assesses employee satisfaction and burnout levels, offering a holistic perspective that goes beyond traditional methods.

In total, this research study serves as a bridge between the domains of data science and management, sociology, HR, and administration. It is aimed at encouraging professionals in these sectors to embrace visualization-based approaches, fostering innovation, and providing actionable insights that can drive positive change within organizations.

Our dataset, though extensive, primarily focuses on standard visualizations for employee survey and demographic data. However, we acknowledge that there is immense potential for further research in areas such as correlation, clustering [29], employee behavior, and burnout analysis. These avenues present opportunities for utilizing modern data science technologies and tools to inform organizational policies.

The richness of our dataset indeed lends itself to various advanced techniques, including ML and DL algorithms. These can be harnessed for predicting burnout, assessing employee satisfaction, generating recruitment ideas, and identifying booming job market sectors. Additionally, text-based data offer an exciting frontier for NLP [30] researchers to uncover behavioral insights. Furthermore, we intend to explore data visualization tools like Tableau and Power BI to create informative dashboards.

Efforts have been made to utilize a multitude of visualization techniques to comprehensively analyze the workplace culture and the interplay of employees within an organization. The canvas of possibilities ranges from discovering unique patterns and correlations in the data to applying more advanced methods of ML such

as DL and NLP models and making common toolkit for survey-based analysis [31]. Such approaches can extract¹ more nuanced insights and may allow for more precise predictions.

References

1. Sias, P. M. 2008. *Organizing relationships: Traditional and emerging perspectives on workplace relationships*. SAGE Publications, Inc. 264 p.
2. Levinson, H. 2009. Reciprocity: The relationship between man and organization. *Consulting psychology: Selected articles by Harry Levinson*. Eds. A. M. Freedman and K. H. Bradt. American Psychological Association. 31–47. doi: 10.1037/11848-002.
3. Coyle-Shapiro, J. A. M., and L. M. Shore. 2007. The employee–organization relationship: Where do we go from here? *Hum. Resour. Manage. R.* 17(2):166–179. doi: 10.1016/j.hrmr.2007.03.008.
4. Korshunov, A., I. Beloborodov, N. Buzun, *et al.* 2014. Analiz sotsial'nykh setey: metody i prilozheniya [Social network analysis: Methods and applications]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS] 26(1):439–456. EDN: RUMXCP.
5. Balkin, D. B., and S. Werner. 2023. Theorizing the relationship between discretionary employee benefits and individual performance. *Hum. Resour. Manage. R.* 33(1):100901. 10 p. doi: 10.1016/j.hrmr.2022.100901.
6. Arzamasova, G. S., and I. A. Esaulova. 2021. Analysis of the environmental employee engagement: A case of a Russian enterprise. *Upravlenets* [The Manager] 12(3):56–66. doi: 10.29141/2218-5003-2021-12-3-5. EDN: MVREHS.
7. Frye, A., C. Boomhower, M. Smith, *et al.* 2018. Employee attrition: What makes an employee quit? *SMU Data Science Review* 1(1):9. 28 p.
8. Brewer, E. W., and L. Shapard. 2004. Employee burnout: A meta-analysis of the relationship between age or years of experience. *Hum. Resour. Dev. Rev.* 3(2):102–123. doi: 10.1177/1534484304263335.
9. Nair, P., J. Krishna, and D. K. Srivastava. 2020. Visual analytics toward prediction of employee erosion through data science tools. *Information and communication technology for sustainable development*. Advances in intelligent systems and computing ser. Singapore: Springer. 933:705–713. doi: 10.1007/978-981-13-7166-0_71.
10. Sainju, B., C. Hartwell, and J. Edwards. 2021. Job satisfaction and employee turnover determinants in Fortune 50 companies: Insights from employee reviews from Indeed.com. *Decis. Support Syst.* 148:113582. 14 p. doi: 10.1016/j.dss.2021.113582.
11. Sanchez, P. M. 2007. The employee survey: More than asking questions. *J. Business Strategy* 28(2):48–56. doi: 10.1108/02756660710732657.
12. Munková, D., M. Munk, and M. Vozár. 2013. Data pre-processing evaluation for text mining: Transaction/sequence model. *Procedia Comput. Sci.* 18:1198–1207. doi: 10.1016/j.procs.2013.05.286.
13. Acuna, E., and C. Rodriguez. 2004. The treatment of missing values and its effect on classifier accuracy. *Classification, clustering, and data mining applications*. Eds.

¹ All the data are available at https://github.com/MrBhimani/Employee_Survey_Analysis.

- D. Banks, F. R. McMorris, P. Arabie, and W. Gaul. Berlin, Heidelberg: Springer. 639–647. doi: 10.1007/978-3-642-17103-1_60.
14. Mukhiya, S. K., and U. Ahmed. 2020. *Hands-on exploratory data analysis with Python: Perform EDA techniques to understand, summarize, and investigate your data*. Packt Publishing Ltd. 352 p.
 15. Butcher, B., and B. J. Smith. 2020. Feature engineering and selection: A practical approach for predictive models. *Am. Stat.* 74(3):308–309. doi: 10.1080/00031305.2020.1790217.
 16. Shanin, I. A., and S. A. Stupnikov. 2021. Metody analiza dannykh elektroentsefalografii s primeneniem svertochnykh i rekurrentnykh neyronnykh setey [Electroencephalography data analysis with convolutional and recurrent neural networks]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(2):36–46. doi: 10.14357/08696527210204. EDN: JDYCAC.
 17. Djukova, E. V., G. O. Masliakov, and A. P. Djukova. 2023. Logicheskie metody korrektnoy klassifikatsii dannykh [Logical methods of correct data classification]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(3):64–70. doi: 10.14357/19922264230309. EDN: OZHXOX.
 18. Kowsari, K., K. J. Meimandi, M. Heidarysafa, *et al.* 2019. Text classification algorithms: A survey. *Information* 10(4):150. 68 p. doi: 10.3390/info10040150.
 19. Vinutha, H. P., B. Poornima, and B. M. Sagar. 2018. Detection of outliers using interquartile range technique from intrusion dataset. *Information and decision sciences*. Eds. S. Satapathy, J. Tavares, V. Bhateja, and J. Mohanty. Advances in intelligent systems and computing ser. Singapore: Springer. 701:511–518. doi: 10.1007/978-981-10-7563-6_53.
 20. Dzisevič, R., and D. Šešok. 2019. Text classification using different feature extraction approaches. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences Proceedings*. IEEE. Art. 8732167. 4 p. doi: 10.1109/eStream.2019.8732167.
 21. Fastje, F., J. Mesmer-Magnus, R. Guidice, and M. C. Andrews. 2023. Employee burnout: The dark side of performance-driven work climates. *J. Organizational Effectiveness People Performance* 10(1):1–21. doi: 10.1108/JOEPP-10-2021-0274.
 22. Ponnuru, S. R., G. K. Merugumala, S. Padigala, *et al.* 2020. Employee attrition prediction using logistic regression. *Int. J. Research Applied Science Engineering Technology* 8(5):2871–2875. doi: 10.22214/ijraset.2020.5481.
 23. Najafi-Zangeneh, S., N. Shams-Gharneh, A. Arjomandi-Nezhad, and S. H. Zolfani. 2021. An improved machine learning-based employees attrition prediction framework with emphasis on feature selection. *Mathematics* 9(11):1226. 14 p. doi: 10.3390/math9111226.
 24. Srivastava, D. K., and P. Nair. 2018. Employee attrition analysis using predictive techniques. *Information and communication technology for intelligent systems*. Smart innovation, systems and technologies ser. Cham: Springer. 83(1):293–300. doi: 10.1007/978-3-319-63673-3_35.
 25. Yandi, A., and H. B. H. Havidz. 2022. Employee performance model: Work engagement through job satisfaction and organizational commitment (a study of human resource management literature study). *Dinasti Int. J. Management Science* 3(3):547–565. doi: 10.31933/dijms.v3i3.1105.
 26. Kovaleva, A. V. 2022. Obzor problemy bar'eroi dolzhnostnogo prodvizheniya v sovremennom obshchestve [Overview of the problem of barriers to career growth in the

- modern labor market]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza RAN* [Proceedings of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Sciences] 71(4):28–38. doi: 10.14357/20790279220404. EDN: SDJHCH.
27. Grządzielewska, M. 2021. Using machine learning in burnout prediction: A survey. *Child Adolescent Social Work J.* 38(2):175–180. doi: 10.1007/s10560-020-00733-w.
28. Caughlin, D. E., and T. N. Bauer. 2019. Data visualizations and human resource management: The state of science and practice. *Res. Pers. Hum. Res. Man.* 37:89–132. doi: 10.1108/S0742-730120190000037004.
29. Anikin, V. I., O. V. Anikina, and A. A. Karmanova. 2016. Eksperimental'nyy analiz odnogo metoda klasterizatsii i ranzhirovaniya mnogomernykh dannykh neyronnoy set'yu Kokhonena [The experimental analysis of the method of clustering and ranking of multi-dimensional data using the Kohonen neural network]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(1):44–61. doi: 10.14357/08696527160104. EDN: VZBFMF.
30. Chistova, E. V., A. O. Shelmanov, and I. V. Smirnov. 2019. Primenenie glubokogo obucheniya k modelirovaniyu dialoga na estestvennom yazyke [Natural language dialogue modelling with deep learning]. *Trudy instituta sistemnogo analiza RAN* [Proceedings of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Sciences] 69(1):105–115. doi: 10.14357/20790279190110. EDN: ELNAMO.
31. Meadow, C. T., B. R. Boyce, D. H. Kraft, and C. Barry. 2017. *Text information retrieval systems*. Elsevier. 364 p.

Received March 13, 2024

Contributors

Bhimani Kishankumar R. (b. 1995) — PhD student, School of Data Analysis and Artificial Intelligence, Faculty of Computer Science, National Research University Higher School of Economics, 11 Pokrovsky Blvd., Moscow 109028, Russian Federation; research assistant, Laboratory on AI for Computational Biology, Faculty of Computer Science, National Research University Higher School of Economics, 11 Pokrovsky Blvd., Moscow 109028, Russian Federation; kbhimani@hse.ru

Saradva Khushbu N. (b. 1994) — research assistant, Laboratory on AI for Computational Biology, Faculty of Computer Science, National Research University Higher School of Economics, 11 Pokrovsky Blvd., Moscow 109028, Russian Federation; khsaradva@edu.hse.ru

О ПОДХОДЕ К АНАЛИЗУ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ В ОБЛАСТИ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ СОТРУДНИКОМ И ОРГАНИЗАЦИЕЙ*

Кишанкумар Бхимани¹, Хушбу Сарадва²

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

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

Аннотация: Все большее число областей науки и промышленности опирается на интенсивное использование данных. В таких областях получение новых знаний уже практически невозможно без применения современных методов анализа и визуализации данных. Характерным примером служит область управления персоналом. В данной работе предложен подход к применению исследовательского анализа данных, извлечения признаков из данных, предиктивной аналитики для анализа взаимоотношений между сотрудником и организацией. Корреляционный анализ применяется для выявления зависимостей между атрибутами данных и оценки степени этих зависимостей. При извлечении признаков используются облака слов и отбор признаков по условию. Конструируется признак, отвечающий риску ухода сотрудника из организации. Подход применяется к общенациональному набору данных опроса сотрудников организаций и развивает применение методов информатики в социологии и управлении персоналом.

Ключевые слова: анализ данных; визуализация данных; управление персоналом; взаимоотношения между сотрудником и организацией

DOI: 10.14357/08696527240410

EDN: OMTEED

Литература

1. *Sias P. M.* Organizing relationships: Traditional and emerging perspectives on workplace relationships. — SAGE Publications, Inc., 2008. 264 p.
2. *Levinson H.* Reciprocity: The relationship between man and organization // Consulting psychology: Selected articles by Harry Levinson / Eds. A. M. Freedman, K. H. Bradt. — American Psychological Association, 2009. P. 31–47. doi: 10.1037/11848-002.
3. *Coyle-Shapiro J. A. M., Shore L. M.* The employee–organization relationship: Where do we go from here? // Hum. Resour. Manage. R., 2007. Vol. 17. Iss. 2. P. 166–179. doi: 10.1016/j.hrmr.2007.03.008.

*Статья публикуется по представлению программного комитета XXV Международной конференции «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных» (DAMDID/RCDL 2023).

4. Коршунов А., Белобородов И., Бузун Н. и др. Анализ социальных сетей: методы и приложения // Труды Института системного программирования РАН, 2014. Т. 26. № 1. С. 439–456. EDN: RUMXCP.
5. Balkin D. B., Werner S. Theorizing the relationship between discretionary employee benefits and individual performance // Hum. Resour. Manage. R., 2023. Vol. 33. Iss. 1. Art. 100901. 10 p. doi: 10.1016/j.hrmmr.2022.100901.
6. Arzamasova G. S., Esaurova I. A. Analysis of the environmental employee engagement: A case of a Russian enterprise // Управленец, 2021. Т. 12. № 3. С. 56–66. doi: 10.29141/2218-5003-2021-12-3-5. EDN: MVREHS.
7. Frye A., Boomhower C., Smith M., et al. Employee attrition: What makes an employee quit? // SMU Data Science Review, 2018. Vol. 1. Iss. 1. Art. 9. 28 p.
8. Brewer E. W., Shapard L. Employee burnout: A meta-analysis of the relationship between age or years of experience // Hum. Resour. Dev. Rev., 2004. Vol. 3. Iss. 2. P. 102–123. doi: 10.1177/1534484304263335.
9. Nair P., Krishna J., Srivastava D. K. Visual analytics toward prediction of employee erosion through data science tools // Information and communication technology for sustainable development. — Advances in intelligent systems and computing ser. — Singapore: Springer, 2020. Vol. 933. P. 705–713. doi: 10.1007/978-981-13-7166-0_71.
10. Sainju B., Hartwell C., Edwards J. Job satisfaction and employee turnover determinants in Fortune 50 companies: Insights from employee reviews from Indeed.com // Decis. Support Syst., 2021. Vol. 148. Art. 113582. 14 p. doi: 10.1016/j.dss.2021.113582.
11. Sanchez P. M. The employee survey: More than asking questions // J. Business Strategy, 2007. Vol. 28. Iss. 2. P. 48–56. doi: 10.1108/02756660710732657.
12. Munková D., Munk M., Vozár M. Data pre-processing evaluation for text mining: Transaction/sequence model // Procedia Comput. Sci., 2013. Vol. 18. P. 1198–1207. doi: 10.1016/j.procs.2013.05.286.
13. Acuna E., Rodriguez C. The treatment of missing values and its effect on classifier accuracy // Classification, clustering, and data mining applications / Eds. D. Banks, F. R. McMorris, P. Arabie, W. Gaul. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 639–647. doi: 10.1007/978-3-642-17103-1_60.
14. Mukhiya S. K., Ahmed U. Hands-on exploratory data analysis with Python: Perform EDA techniques to understand, summarize, and investigate your data. — Packt Publishing Ltd., 2020. 352 p.
15. Butcher B., Smith B. J. Feature engineering and selection: A practical approach for predictive models // Am. Stat., 2020. Vol. 74. Iss. 3. P. 308–309. doi: 10.1080/00031305.2020.1790217.
16. Шанин И. А., Ступников С. А. Методы анализа данных электроэнцефалографии с применением сверточных и рекуррентных нейронных сетей // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 2. С. 36–46. doi: 10.14357/08696527210204. EDN: JDYCAG.
17. Дюкова Е. В., Масляков Г. О., Дюкова А. П. Логические методы корректной классификации данных // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 3. С. 64–70. doi: 10.14357/19922264230309. EDN: OZHXOX.
18. Kowsari K., Meimandi K. J., Heidarysafa M., et al. Text classification algorithms: A survey // Information, 2019. Vol. 10. Iss. 4. Art. 150. 68 p. doi: 10.3390/info10040150.

19. Vinutha H. P., Poornima B., Sagar B. M. Detection of outliers using interquartile range technique from intrusion dataset // Information and decision sciences / Eds. S. Satapathy, J. Tavares, V. Bhateja, J. Mohanty. — Advances in intelligent systems and computing ser. — Singapore: Springer, 2018. Vol. 701. P. 511–518. doi: 10.1007/978-981-10-7563-6_53.
20. Dzisevič R., Šešok D. Text classification using different feature extraction approaches // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences Proceedings. — IEEE, 2019. Art. 8732167. 4 p. doi: 10.1109/eStream.2019.8732167.
21. Fastje F., Mesmer-Magnus J., Guidice R., Andrews M. C. Employee burnout: The dark side of performance-driven work climates // J. Organizational Effectiveness People Performance, 2023. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–21. doi: 10.1108/JOEPP-10-2021-0274.
22. Ponnuru S. R., Merugumala G. K., Padigala S., et al. Employee attrition prediction using logistic regression // Int. J. Research Applied Science Engineering Technology, 2020. Vol. 8. Iss. 5. P. 2871–2875. doi: 10.22214/ijraset.2020.5481.
23. Najafi-Zangeneh S., Shams-Gharneh N., Arjomandi-Nezhad A., Zolfani S. H. An improved machine learning-based employees attrition prediction framework with emphasis on feature selection // Mathematics, 2021. Vol. 9. Iss. 11. Art. 1226. 14 p. doi: 10.3390/math9111226.
24. Srivastava D. K., Nair P. Employee attrition analysis using predictive techniques // Information and communication technology for intelligent systems. — Smart innovation, systems and technologies ser. — Cham: Springer, 2018. Vol. 83(1). P. 293–300. doi: 10.1007/978-3-319-63673-3_35.
25. Yandi A., Havidz H. B. H. Employee performance model: Work engagement through job satisfaction and organizational commitment (a study of human resource management literature study) // Dinasti Int. J. Management Science, 2022. Vol. 3. Iss. 3. P. 547–565. doi: 10.31933/dijms.v3i3.1105.
26. Ковалева А. В. Обзор проблемы барьеров должностного продвижения в современном обществе // Труды Института системного анализа РАН, 2022. Т. 71. № 4. С. 28–38. doi: 10.14357/20790279220404. EDN: SDJHCH.
27. Grzqdzielewska M. Using machine learning in burnout prediction: A survey // Child Adolescent Social Work J., 2021. Vol. 38. Iss. 2. P. 175–180. doi: 10.1007/s10560-020-00733-w.
28. Caughlin D. E., Bauer T. N. Data visualizations and human resource management: The state of science and practice // Res. Pers. Hum. Res. Man., 2019. Vol. 37. P. 89–132. doi: 10.1108/S0742-730120190000037004.
29. Аникин В. И., Аникина О. В., Карманова А. А. Экспериментальный анализ одного метода кластеризации и ранжирования многомерных данных нейронной сетью Кохонена // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 1. С. 44–61. doi: 10.14357/08696527160104. EDN: VZBFMF.
30. Чистова Е. В., Шелманов А. О., Смирнов И. В. Применение глубокого обучения к моделированию диалога на естественном языке // Труды Института системного анализа Российской академии наук, 2019. Т. 69. № 1. С. 105–115. doi: 10.14357/20790279190110. EDN: ELNAMO.
31. Meadow C. T., Boyce B. R., Kraft D. H., Barry C. Text information retrieval systems. — Elsevier, 2017. 364 p.

Поступила в редакцию 13.03.2024

Агаларов Явер Мирзабекович (р. 1952) — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Бхимани Кишанкумар Рамешбхай (р. 1995) — аспирант Департамента анализа данных и искусственного интеллекта факультета компьютерных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»; стажер-исследователь научно-учебной лаборатории искусственного интеллекта для вычислительной биологии, факультета компьютерных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Гончаров Александр Анатольевич (р. 1994) — научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Дьяченко Юрий Георгиевич (р. 1958) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Зацаринный Александр Алексеевич (р. 1951) — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Ильин Владимир Дмитриевич (р. 1937) — доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Назарын Артем Игоревич (р. 2000) — магистрант кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов

Парамзин Федор Николаевич (р. 1993) — врач-онколог ГБУЗ КО «Центральная городская клиническая больница»; аспирант Балтийского федерального университета им. И. Канта

Румовская София Борисовна (р. 1985) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Сарадва Хушбу Наротгамбхай (р. 1994) — стажер-исследователь научно-учебной лаборатории искусственного интеллекта для вычислительной биологии факультета компьютерных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Синицын Игорь Николаевич (р. 1940) — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Федерального

исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Советов Станислав Игоревич (р. 1990) — аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета

Сопин Эдуард Сергеевич (р. 1987) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов; старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Степченков Юрий Афанасьевич (р. 1951) — кандидат технических наук, заведующий отделом, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Сучков Александр Павлович (р. 1954) — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Торчигин Владимир Павлович (р. 1938) — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Тюрин Сергей Феофанович (р. 1953) — доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета; профессор кафедры «Математическое обеспечение вычислительных систем» Пермского государственного национального исследовательского университета

Шоргин Сергей Яковлевич (р. 1952) — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2024 г.

	№	Стр.
Агаларов Я. М. Оптимизация порогового параметра RED-подобного алгоритма управления очередью модели $G/M/1$	4	31–47
Адамович И. М., Волков О. И. Коллективное разрешение сущностей в технологии поддержки конкретно-исторических исследований	1	128–138
Адамович И. М., Волков О. И. Метод поиска оптимальных значений параметров алгоритма разрешения сущностей для конкретно-исторических данных	2	123–133
Будзко В. И., Меденников В. И. Математическое моделирование оценки влияния глобальных изменений в мире на цифровой след российских университетов на примере аграрных	1	111–127
Бхимани Кишанкумар, Сарадва Хушбу О подходе к анализу и визуализации данных в области взаимоотношений между сотрудником и организацией	4	115–136
Власкина А. С. см. Кочеткова И. А.		
Волков О. И. см. Адамович И. М.		
Волков О. И. см. Адамович И. М.		
Гаврилов В. Е., Зацаринный А. А. Особенности обеспечения функциональной безопасности автоматизированных систем с применением технологии искусственного интеллекта	3	23–34
Гайдамака Ю. В. см. Румянцева А. С.		
Гончаров А. А. Развитие структуры надкорпусных баз данных	4	73–84
Гринченко С. Н. О параллелизме в развитии базисных информационных технологий, пространственных типов цивилизаций и типологии знаковых систем	1	139–149
Грушо А. А., Грушо Н. А., Забежайло М. И., Зацаринный А. А., Смирнов Д. В., Тимонина Е. Е. Мониторинг функциональной безопасности больших сервисных систем	3	3–13
Грушо А. А. см. Смирнов Д. В.		
Грушо Н. А. см. Грушо А. А.		
Дьяченко Д. Ю. см. Степченков Ю. А.		
Дьяченко Д. Ю. см. Степченков Ю. А.		
Дьяченко Ю. Г. см. Степченков Ю. А.		
Дьяченко Ю. Г. см. Степченков Ю. А.		
Дьяченко Ю. Г. см. Степченков Ю. А.		
Дьяченко Ю. Г. см. Тюрин С. Ф.		

	№	Стр.
Егоров В. Б. Некоторые сетевые аспекты программного определения «облачных» платформ	1	102–110
Егоров В. Б. Эволюция и перспективы концепции программного определения	2	83–94
Елисеев В. А. см. Федосеев Д. В.		
Забежайло М. И. см. Грушо А. А.		
Забежайло М. И. см. Смирнов Д. В.		
Зацаринный А. А., Сучков А. П. Проблемы целеполагания в аппаратно-программном комплексе «Безопасный город»	4	97–107
Зацаринный А. А. см. Гаврилов В. Е.		
Зацаринный А. А. см. Грушо А. А.		
Илларионова Л. В. см. Федосеев Д. В.		
Ильин В. Д. Онлайн-энциклопедии: актуальные проблемы развития	3	147–157
Ильин В. Д. Теория S-символов: развитие и применение	4	85–96
Кириков И. А. см. Листопад С. В.		
Конашенкова Т. Д. см. Синицын И. Н.		
Конашенкова Т. Д. см. Синицын И. Н.		
Корепанов Э. Р. см. Синицын И. Н.		
Корепанов Э. Р. см. Синицын И. Н.		
Кочеткова И. А., Власкина А. С., Эсенг Манге П. Л. Э., Шоргин В. С. Задача разделения ресурса беспроводной сети по задержке передачи эластичного трафика	1	23–32
Кривенко М. П. Моделирование входного потока рабочих на-грузок вычислительного кластера LANL Mustang	3	109–122
Кривенко М. П. Статистический критерий стабильности системы массового обслуживания, основанный на последовательности времен пребывания	2	55–65
Листопад С. В. Выработка искусственными интеллектуальными рефлексивными агентами тактики ведения переговоров	1	92–101
Листопад С. В., Кириков И. А. Анализ подходов к идентификации структуры проблемы в гибридных интеллектуальных многоагентных системах	3	35–47
Меденников В. И. см. Будзко В. И.		
Морозов Н. В. см. Степченков Ю. А.		
Морозов Н. В. см. Степченков Ю. А.		
Морозов Н. В. см. Степченков Ю. А.		
Москалева Ф. А. см. Румянцева А. С.		
Назарьин А. И., Сопин Э. С., Шоргин С. Я. Разработка сверточного алгоритма для расчета стационарных характеристик ресурсных систем с временем обслуживания, зависящим от объема требований	4	48–58

	№	Стр.
Никишин Д. А. Моделирование динамических геообъектов на основе концепции фазовой вариантности	2	95–106
Орлов Г. А. см. Степченко Ю. А.		
Парамзин Ф. Н. см. Румовская С. Б.		
Прохорец И. О., Степанов А. С. Картографирование земель сельскохозяйственного назначения Хабаровского края методами машинного обучения с использованием изображений Sentinel-2	1	57–69
Прохорец И. О. см. Федосеев Д. В.		
Румовская С. Б. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в медицине: понятие, проблемы, подходы к разработке	2	107–122
Румовская С. Б., Парамзин Ф. Н. Кооперативные самонастраивающиеся гибридные интеллектуальные системы персонализированной диагностики и прогнозирования в медицине: концепция, подход к разработке, декомпозиция проблемы	4	59–72
Румянцева А. С., Москалева Ф. А., Самуйлов А. К., Шоргин С. Я., Гайдамака Ю. В. О моделировании совместного обслуживания одноадресного и многоадресного трафика с приоритизацией	2	40–54
Самуйлов А. К. см. Румянцева А. С.		
Сарадва Хушбу см. Бхимани Кишанкумар		
Семенihin Т. А. Поиск артефактов на изображениях обзора ZTF при помощи нейронных сетей	1	70–79
Синицын В. И. см. Синицын И. Н.		
Синицын В. И. см. Синицын И. Н.		
Синицын И. Н. Аналитическое моделирование стохастических систем, не разрешенных относительно производных, со случайными параметрами	1	4–22
Синицын И. Н. Дискретное условно-оптимальное оценивание в неявных наблюдаемых стохастических системах	4	16–30
Синицын И. Н. Методы вероятностного и статистического моделирования неявных стохастических систем	3	48–66
Синицын И. Н. Методы моделирования неявных эргодических стохастических систем	3	67–86
Синицын И. Н. Условно-оптимальная фильтрация и управление стохастическими системами, не разрешенными относительно производных, со случайными параметрами	2	3–20
Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Моделирование нестационарного стохастического процесса посредством его канонического разложения на основе вейвлет-нейронной сети	2	21–39

	№	Стр.
Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Нейросетевой синтез оптимальной линейной стохастической системы по критерию минимума среднеквадратичной ошибки	3	87–108
Смирнов Д. В., Грушо А. А., Забейайло М. И. К задаче идентификации сбоев в информационно-технологической инфраструктуре путем мониторинга и анализа косвенных данных	3	14–22
Смирнов Д. В. см. Грушо А. А.		
Советов С. И. см. Тюрин С. Ф.		
Сопин Э. С. см. Назарьин А. И.		
Степанов А. С. см. Прохорец И. О.		
Степанов А. С. см. Федосеев Д. В.		
Степченков Д. Ю. см. Степченков Ю. А.		
Степченков Д. Ю. см. Степченков Ю. А.		
Степченков Д. Ю. см. Степченков Ю. А.		
Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Степченков Д. Ю., Дьяченко Д. Ю. Реализация суммирующих самосинхронных счетчиков	3	123–135
Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Степченков Д. Ю., Дьяченко Д. Ю. Формализация синтеза самосинхронных счетчиков	2	66–82
Степченков Ю. А., Хилько Д. В., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Степченков Д. Ю., Орлов Г. А. Методика десинхронизации при синтезе самосинхронных схем	1	33–43
Степченков Ю. А. см. Тюрин С. Ф.		
Сучков А. П. Жизненный цикл кибератак на уязвимости систем машинного обучения	1	80–91
Сучков А. П. см. Зацаринный А. А.		
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.		
Торчигин В. П. Программа РАН «Оптический компьютер» и ее последствия	4	108–114
Тюрин С. Ф., Советов С. И., Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г. Новый подход к реализации логических функций в программируемых логических интегральных схемах	4	3–15
Урюпин И. В. Разработка программного комплекса моделирования эффективности в авиатранспортной системе России	3	136–146
Федосеев Д. В., Степанов А. С., Илларионова Л. В., Елисеев В. А., Прохорец И. О., Фролов А. Н., Шамурин А. И. Разработка информационной системы для хранения и обработки результатов мониторинга сельскохозяйственных угодий юга Дальнего Востока	1	44–56
Фролов А. Н. см. Федосеев Д. В.		

№ Стр.

Хилько Д. В. см. Степченков Ю. А.
Шамурина А. И. см. Федосеев Д. В.
Шоргин В. С. см. Кочеткова И. А.
Шоргин С. Я. см. Назарьин А. И.
Шоргин С. Я. см. Румянцева А. С.
Эсенг Манге П. Л. Э. см. Кочеткова И. А.

2024 AUTHOR INDEX

	No.	Page
Adamovich I. M. and Volkov O. I. Collective entity resolution in technology of concrete historical investigation support	1	128–138
Adamovich I. M. and Volkov O. I. Method for searching for optimal parameter values of the entity resolution algorithm for concrete historical data	2	123–133
Agalarov Ya. M. Optimization of the threshold parameter of a red-like queue management algorithm for a $G/M/1$ queue	4	31–47
Bhimani Kishankumar and Saradva Khushbu . On an approach to data analysis and visualization in the domain of employee–organization relationships	4	115–136
Budzko V. I. and Medennikov V. I. Mathematical modeling for assessing the impact of global changes in the world on the digital footprint of Russian agricultural universities	1	111–117
Diachenko D. Yu. see Stepchenkov Yu. A.		
Diachenko D. Yu. see Stepchenkov Yu. A.		
Diachenko Yu. G. see Stepchenkov Yu. A.		
Diachenko Yu. G. see Stepchenkov Yu. A.		
Diachenko Yu. G. see Stepchenkov Yu. A.		
Diachenko Yu. G. see Tyurin S. F.		
Egorov V. B. Evolution of the “software-defined” concept	2	83–94
Egorov V. B. Some networking aspects of software-defined cloud platforms	1	102–110
Eliseev V. A. see Fedoseev D. V.		
Eseng Mangue P. L. E. see Kochetkova I. A.		
Fedoseev D. V., Stepanov A. S., Illarionova L. V., Eliseev V. A., Prokhorets I. O., Frolov A. N., and Shamurina A. I. Development of information system for storing and processing the results of agricultural land monitoring in the south of the Far East	1	44–56
Frolov A. N. see Fedoseev D. V.		
Gaidamaka Yu. V. see Rumyantseva A. S.		
Gavrilov V. E. and Zatsarinny A. A. Specific features of ensuring the functional safety of automated systems using artificial intelligence technology	3	23–34
Goncharov A. A. Developing the structure of supracorpora databases	4	73–84
Grinchenko S. N. On the comparison of stages of systemic global evolution of humankind and types of semiotic sign systems	1	139–149

	No.	Page
Grusho A.A., Grusho N.A., Zabezhailo M.I., Zatsarinny A.A., Smirnov D.V., and Timonina E.E. Functional safety monitoring of large service systems	3	3–13
Grusho A.A. see Smirnov D.V.		
Grusho N.A. see Grusho A.A.		
Illarionova L.V. see Fedoseev D.V.		
Ilyin V.D. Online encyclopedias: Urgent development challenges	3	147–157
Ilyin V.D. Theory of S-symbols: Development and application	4	85–96
Khilko D.V. see Stepchenkov Yu. A.		
Kirikov I.A. see Listopad S.V.		
Kochetkova I.A., Vlaskina A.S., Eseng Mangué P.L.E., and Shorgin V.S. Radio resource allocation for elastic traffic transmission with latency fairness in wireless networks	1	23–32
Konashenkova T.D. see Sinitsyn I.N.		
Konashenkova T.D. see Sinitsyn I.N.		
Korepanov E.R. see Sinitsyn I.N.		
Korepanov E.R. see Sinitsyn I.N.		
Krivenko M.P. Modeling of the input flow of LANL mustang computing cluster workloads	3	109–122
Krivenko M.P. Statistical criterion for queuing system stability based on time spent series	2	55–65
Listopad S.V. Development of negotiation tactics by artificial intelligent reflexive agents	1	92–101
Listopad S.V. and Kirikov I.A. Analysis of approaches to problem structure identification in hybrid intelligent multiagent systems	3	35–47
Medennikov V.I. see Budzko V.I.		
Morozov N.V. see Stepchenkov Yu. A.		
Morozov N.V. see Stepchenkov Yu. A.		
Morozov N.V. see Stepchenkov Yu. A.		
Moskaleva F.A. see Rumyantseva A. S.		
Nazarin A.I., Sopin E.S., and Shorgin S.Ya. Development of a convolutional algorithm for calculating the stationary characteristics of resource loss systems with requirements-depending serving time	4	48–58
Nikishin D.A. An approach to modeling dynamic geoobjects based on the concept of phase variation	2	95–106
Orlov G.A. see Stepchenkov Yu. A.		
Paramzin F.N. see Rumovskaya S. B.		
Prokhorets I.O. and Stepanov A.S. Mapping of the Khabarovsk Region arable lands by machine learning using Sentinel-2 images	1	57–69

	No.	Page
Prokhorets I. O. see Fedoseev D. V.		
Rumovskaya S. B. Intelligent decision support systems in medicine: Concept, problems, and approaches to the development	2	107–122
Rumovskaya S. B. and Paramzin F. N. Cooperative self-configuring hybrid intelligent systems for personalized diagnostics and prognosis in medicine: Conceptual idea, development approach, and problem decomposition	4	59–72
Rumyantseva A. S., Moskaleva F. A., Samouylov A. K., Shorgin S. Ya., and Gaidamaka Yu. V. On modeling shared service of unicast and multicast traffic with prioritization	2	40–54
Samouylov A. K. see Rumyantseva A. S.		
Saradva Khushbu see Bhimani Kishankumar		
Semenikhin T. A. Neural network architecture for artifacts detection in ZTF survey	1	70–79
Shamurina A. I. see Fedoseev D. V.		
Shorgin S. Ya. see Nazarin A. I.		
Shorgin S. Ya. see Rumyantseva A. S.		
Shorgin V. S. see Kochetkova I. A.		
Sinitsyn I. N. Analytical modeling of stochastic systems with random parameters and unsolved derivatives	1	4–22
Sinitsyn I. N. Conditionally-optimal filtration and control for stochastic systems with random parameters and unsolved derivatives	2	3–20
Sinitsyn I. N. Discrete conditionally-optimal estimation in observable implicit stochastic systems	4	16–30
Sinitsyn I. N. Modeling methods for implicit hereditary stochastic systems	3	67–86
Sinitsyn I. N. Probabilistic and statistical modeling methods for implicit stochastic systems	3	48–66
Sinitsyn I. N., Sinitsyn V. I., Korepanov E. R., and Konashenkova T. D. Neural network synthesis of an optimal linear stochastic system according to the criterion of minimum mean square error	3	87–108
Sinitsyn I. N., Sinitsyn V. I., Korepanov E. R., and Konashenkova T. D. Nonstationary stochastic process modeling by canonical expansion and wavelet neutral network	2	21–39
Sinitsyn V. I. see Sinitsyn I. N.		
Sinitsyn V. I. see Sinitsyn I. N.		
Smirnov D. V., Grusho A. A., and Zabezhailo M. I. To the problem of identifying failures in the information technology infrastructure by monitoring and analyzing indirect data	3	14–22

	No.	Page
Smirnov D. V. see Grusho A. A.		
Sopin E. S. see Nazarin A. I.		
Sovetov S. I. see Tyurin S. F.		
Stepanov A. S. see Fedoseev D. V.		
Stepanov A. S. see Prokhorets I. O.		
Stepchenkov D. Yu. see Stepchenkov Yu. A.		
Stepchenkov D. Yu. see Stepchenkov Yu. A.		
Stepchenkov D. Yu. see Stepchenkov Yu. A.		
Stepchenkov Yu. A., Diachenko Yu. G., Morozov N. V., Stepchenkov D. Yu., and Diachenko D. Yu. Self-timed counter synthesis formalization	2	66–82
Stepchenkov Yu. A., Diachenko Yu. G., Morozov N. V., Stepchenkov D. Yu., and Diachenko D. Yu. Self-timed up counter implementation	3	123–135
Stepchenkov Yu. A., Khilko D. V., Diachenko Yu. G., Moro- zov N. V., Stepchenkov D. Yu., and Orlov G. A. Desyn- chronization methodology at self-timed circuit synthesis	1	33–43
Stepchenkov Yu. A. see Tyurin S. F.		
Suchkov A. P. The lifecycle of cyberattacks on machine learning system vulnerabilities	1	80–91
Suchkov A. P. see Zatsarinny A. A.		
Timonina E. E. see Grusho A. A.		
Torchigin V. P. The RAS program “Optical Computer” and its consequences	4	108–114
Tyurin S. F., Sovetov S. I., Stepchenkov Yu. A., and Dia- chenko Yu. G. A new approach to implementing logical functions in field-programmable gate arrays	4	3–15
Uryupin I. V. Development of a software package for modeling efficiency in the Russian air transport system	3	136–146
Vlaskina A. S. see Kochetkova I. A.		
Volkov O. I. see Adamovich I. M.		
Volkov O. I. see Adamovich I. M.		
Zabezhaïlo M. I. see Grusho A. A.		
Zabezhaïlo M. I. see Smirnov D. V.		
Zatsarinny A. A. and Suchkov A. P. The problems of goal setting in the hardware and software complex “Safe City”	4	97–107
Zatsarinny A. A. see Gavrilov V. E.		
Zatsarinny A. A. see Grusho A. A.		

Правила подготовки рукописей статей для публикации в журнале «Системы и средства информатики»

Журнал «Системы и средства информатики» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информационных технологий.

Журнал издается на русском языке. По специальному решению редколлегии отдельные статьи могут печататься на английском языке.

Тематика журнала охватывает следующие направления:

- информационно-телекоммуникационные системы и средства их построения;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и сетей;
- методы и средства защиты информации.

1. В журнале печатаются статьи, содержащие результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях.

Публикация предоставленной автором(ами) рукописи не должна нарушать положений глав 69, 70 раздела VII части IV Гражданского кодекса, которые определяют права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации, в том числе авторские права, в РФ.

Ответственность за нарушение авторских прав, в случае предъявления претензий к редакции журнала, несут авторы статей.

Направляя рукопись в редакцию, авторы сохраняют свои права на данную рукопись и при этом передают учредителям и редколлегии журнала неисключительные права на издание статьи на русском языке (или на языке статьи, если он отличен от русского) и на перевод ее на английский язык, а также на ее распространение в России и за рубежом. Каждый автор должен представить в редакцию подписанный с его стороны «Лицензионный договор о передаче неисключительных прав на использование произведения», текст которого размещен по адресу <http://www.ipiran.ru/publications/licence.doc>. Этот договор может быть представлен в бумажном (в 2-х экз.) или в электронном виде (отсканированная копия заполненного и подписанного документа).

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности публикации представленной статьи в открытой печати.

2. К статье прилагаются данные автора (авторов) (см. п. 8). При наличии нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией.
3. Редакция журнала осуществляет экспертизу присланных статей в соответствии с принятой в журнале процедурой рецензирования.

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.

4. Решение редколлегии о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редакции должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или ЛАТЭХ (.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 выше 10 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 оформления представлены в интернете:

http://www.ipiran.ru/journal/template_iiep_ssi_2024.zip

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/2019_29_03_rus/authors.asp и
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_eng/authors.asp;
- аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
- ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами.
- источники финансирования работы (ссылка на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.).

9. Требования к спискам литературы.

Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в каждом из списков литературы в порядке первых упоминаний.

Списки литературы представляются в двух вариантах:

- (1) **Список литературы к русскоязычной части.** Русские и английские работы — на языке и в алфавите оригинала.
- (2) **References.** Русские работы и работы на других языках — в латинской транслитерации с переводом на английский язык; английские работы и работы на других языках — на языке оригинала.

Необходимо для составления списка “References” пользоваться размещенной на сайте <http://www.translit.net/ru/bgn/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу.

Список литературы “References” приводится полностью отдельным блоком, повторяя все позиции из списка литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы к русскоязычной части есть ссылки на иностранные публикации, набранные латиницей, они полностью повторяются в списке “References”.

Примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”:

Описание статьи из журнала:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Russ. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Описание материалов конференций:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povyseniya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Описание переводной книги (в списке литературы к русскоязычной части необходимо указать: / Пер. с англ. — после названия книги, а в конце ссылки указать оригинал книги в круглых скобках):

1. В русскоязычной части:

Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (*Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W.* Vibration problems in engineering. — 4th ed. — New York, NY, USA: Wiley, 1974. 521 p.)

2. В англоязычной части:

Timoshenko, S. P., D. H. Young, and W. Weaver. 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, NY: Wiley. 521 p.

Описание неопубликованного документа:

Latypov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004. Geology and production (NGT GiD). Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198. (In Russian, unpubl.)

Описание интернет-ресурса:

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov, V. I. 2003. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyy tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. Moscow. D.Sc. Diss. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovary informat-ionnogo 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 kolichstva 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 Publ. 10 p.

Описание патента:

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

10. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.

11. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:

- указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
- указывать в тексте письма название статьи, авторов и журнал, в который направляется статья;
- 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: ssi@frccsc.ru (Стригина Светлана Николаевна)

<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 10 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/journal/template_jiep_ssi_2024.zip

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/2019_29_03_rus/authors.asp and
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_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. *Russ. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Journal article in electronic format:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B.P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Conference proceedings:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Books and other monographs:

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogenera-torov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publ. 352 p.

Dissertation and Thesis:

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovaryia informat-sionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. Moscow: IPI RAN. PhD Thesis. 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 Publ. 10 p.

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

References in Latin transcription are presented in the original language.

References in the text are numbered according to the order of their first appearance; the number is placed in square brackets. All items from the reference list should be cited.

10. Manuscripts and additional materials are not returned to Authors by the Editorial Board.
11. Submissions of files by e-mail must include:
 - the journal title and author's name in the "Subject" field;
 - the article title, authors' names, and the journal title, whereto the paper is being submitted, in the text of the e-mail;
 - 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: ssi@frccsc.ru (to Svetlana Strigina)

http://www.ipiran.ru/english/journal_systems.asp