

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, 2023

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

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

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

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

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

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 33 № 4 Год 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Замена синхронных триггеров самосинхронными аналогами в процессе десинхронизации схемы Ю. А. Степченков, Д. Ю. Степченков, Ю. Г. Дьяченко, Н. В. Морозов, Л. П. Плеханов	4
Характеристики и логическая структура методологии построения рефлексивно-активных систем искусственных гетерогенных интеллектуальных агентов С. В. Листопад	16
Автоматные модели распространения сбоев и самовосстановления А. А. Грушо, Н. А. Грушо, М. И. Забежайло, В. О. Писковский, Д. В. Смирнов, Е. Е. Тимонина	28
Расчет целевых значений коэффициентов готовности для диагностик ИТЭР Г. М. Коновалов	38
Алгоритм глобальной оптимизации некоторых стационарных временных характеристик заданий в частично наблюдаемых стохастических системах с параллельным обслуживанием М. Г. Коновалов, Р. В. Разумчик	50
Модель для выбора уровней скорости широкополосного трафика eMBB в условиях приоритетной передачи трафика URLLC в сети 5G Е. Д. Макеева, И. А. Кочеткова, В. С. Шоргин	60
Анализ совместного использования стратегий энергосбережения для устройств 5G с ограниченным функционалом В. А. Бесчастный, Е. С. Голос, Д. Ю. Острикова, Е. А. Мачнев, В. С. Шоргин, Ю. В. Гайдамака	69

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 33 № 4 Год 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Методы оптимизации скорости выполнения функциональных запросов в автоматизированных информационных системах с учетом смыслового анализа информации	
<i>Т. К. Бирюкова, М. М. Гершкович</i>	82
Метод компьютерного моделирования упругих характеристик многослойных композиционных материалов	
<i>К. К. Абгарян, Н. Л. Загордан, Ю. Д. Мочалова</i>	92
Поиск с исключением в параллельных текстах	
<i>А. А. Гончаров</i>	102
Графовые n -граммы в задаче атрибуции текстов	
<i>Н. Д. Москин, А. А. Рогов, А. А. Лебедев</i>	115
Научная парадигма информатики: классификация трансформаций объектов предметной области	
<i>И. М. Зацман</i>	126
Теория S-символов: классы базовых S-задач	
<i>В. Д. Ильин</i>	139
Несбалансированность классов в технологии поддержки конкретно-исторических исследований	
<i>И. М. Адамович, О. И. Волков</i>	149
Об авторах	160
Авторский указатель за 2023 г.	163
2023 Author Index	169
Правила подготовки рукописей статей	175
Requirements for manuscripts	179

ЗАМЕНА СИНХРОННЫХ ТРИГГЕРОВ САМОСИНХРОННЫМИ АНАЛОГАМИ В ПРОЦЕССЕ ДЕСИНХРОНИЗАЦИИ СХЕМЫ*

Ю. А. Степченков¹, Д. Ю. Степченков², Ю. Г. Дьяченко³, Н. В. Морозов⁴,
Л. П. Плеханов⁵

Аннотация: Самосинхронные (СС) цифровые схемы обладают рядом преимуществ в сравнении с синхронными аналогами и становятся перспективным базисом для реализации надежных вычислительных систем, эксплуатируемых в экстремальных условиях. Отсутствие эффективных средств автоматизированного синтеза СС-схем, удобных для использования разработчиками, обученными работе с системами автоматизированного проектирования синхронных схем, в значительной мере тормозит внедрение СС-схем в практику разработки цифровых схем. Подход к синтезу СС-схем, основанный на преобразовании исходного синхронного Verilog-описания алгоритма работы схемы в СС-реализацию по формализованным правилам в автоматическом режиме с минимальным интерактивным участием разработчика, обеспечивает быстрое получение СС-решения с приемлемыми характеристиками и не требует от проектировщика глубоких познаний в области самосинхронности. Он опирается на базовые принципы построения СС-схем и эвристические методы их разработки. Один из важных и неоднозначных этапов проектирования СС-схем в этом подходе — замена синхронных триггеров их СС-аналогами. Для этого предлагается использовать метод замены синхронного триггера его СС-аналогом с помощью табличного формализованного соответствия на базе готовой библиотеки СС-триггеров и анализа окружения триггера.

Ключевые слова: самосинхронная схема; логический синтез; триггер; Verilog; замена; таблица соответствия

DOI: 10.14357/08696527230401

EDN: VPLSHI

1 Введение

Подавляющее большинство изделий цифровой техники в настоящее время реализуется на базе синхронного подхода: глобальный тактовый сигнал синхронизирует взаимодействие отдельных компонентов устройства и все устройство

* Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект 22-19-00237).

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

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

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

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

⁵Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, lplekhanov@inbox.ru

в составе общей системы и обеспечивает одновременность событий, происходящих в разных частях схемы. В условиях постоянного усложнения цифровой начинки одной микросхемы дерево глобального тактового сигнала становится весьма затратным и энергопотребляющим.

Самосинхронные цифровые схемы представляют собой альтернативу синхронной схемотехнике. Они не используют глобальный синхросигнал для временного согласования событий в схеме. Их работа основана на запрос-ответном взаимодействии взаимосвязанных устройств, опирающемся на избыточное кодирование информации, двухфазную дисциплину работы и обязательное подтверждение успешного завершения переключения всех элементов схемы в очередную фазу функционирования [1, 2]. Благодаря этому СС-схемы работают корректно при любых условиях эксплуатации и останавливаются при появлении отказа (константной неисправности).

В сравнении с синхронными аналогами СС-схемы имеют избыточные аппаратные затраты, которые и обеспечивают упомянутые выше их уникальные свойства. Однако при достигнутом уровне развития технологии изготовления интегральных микросхем этот недостаток уже не играет определяющей роли. Другим фактором, сдерживающим широкое использование СС-схемотехники в проектировании цифровых устройств, является отсутствие удобных средств автоматизированного синтеза.

Имеющиеся отечественные программные средства разработки СС-схем покрывают только этап анализа схемы на самосинхронность [3–5]. Зарубежные системы автоматизированного проектирования (САПР) асинхронных схем [6–12], к которым относятся и СС-схемы, используют специфические языки описания алгоритма функционирования схемы: сети Петри, сигнальный граф переключений и др., непривычные для разработчиков традиционных синхронных схем. Они требуют от пользователя соответствующего образа мышления и не всегда гарантируют получение адекватного результата [13].

В то же время известны методы [13–17], использующие традиционное синхронное описание синтезируемой схемы для последующей автоматизированной генерации асинхронной схемы. Это очевидный и самый понятный для разработчиков всех типов микросхем подход. Предложенный в [17] общий подход к синтезу опирается на конвертацию исходного синхронного описания алгоритма работы схемы на любом уровне: поведенческом, функциональном, дискретном (в базе библиотеки стандартных элементов) — в СС-схему с использованием эвристических алгоритмов.

Десинхронизация схемы — один из ключевых этапов синтеза СС-схемы в рамках данного подхода. Она заключается в замене сигналов глобальной синхронизации и производных от них локальными фазовыми сигналами управления. При этом возникает задача замены синхронных триггеров их СС-аналогами. Эта задача актуальна, поскольку ее эффективное решение гарантирует корректную и минимальную по аппаратным затратам реализацию СС-схемы в базе ограниченной библиотеки ячеек. Решению этой задачи и посвящена данная статья.

2 Исходное описание триггера на языке Verilog

Анализ состава триггеров, использующихся при автоматизированном проектировании цифровых схем, показывает, что в подавляющем большинстве случаев используются одноктактные и двухтактные триггеры D-типа [18]. Для описания поведения синхронного триггера на языке Verilog используется процедурный блок `always`. Например, блок

```
always@(posedge clk,rst,set) begin
  if(rst)
    B <= 1'b0;
  else
    if(set)
      B <= 1'b1;
    else
      B <= A;
end
```

описывает двухтактный триггер с выходом B , обнуляющий свое состояние при значении входа сброса $rst = 1$, устанавливающий его в «1» при значении входа установки $set = 1$ и запоминающий значение сигнала A при переключении тактового сигнала clk из 0 в 1. Сброс и установка могут отсутствовать, запись в триггер может быть ограничена какими-то условиями. Аналогичный блок

```
always@(clk, rst, set) begin{. . .} end
```

описывает одноктактный триггер, запоминающий значение сигнала A при высоком уровне тактового входа $clk = 1$.

Анализ списка чувствительности блока `always` и его тела позволяет однозначно определить особенности функционирования описываемого им триггера и выбрать правильную ячейку для его реализации из указанной библиотеки стандартных элементов. Эта процедура реализована в любой из синхронных САПР, в том числе и в САПР с открытым кодом, например Yosys [19]. Поэтому достаточно использовать Yosys для реализации данного этапа логического синтеза СС-схемы, а затем подобрать подходящий аналог среди известных СС-триггеров. Такой подбор нетривиален и неоднозначен. Он и выбран предметом настоящей статьи.

3 Общие признаки синхронных и самосинхронных триггеров

Синхронные D-триггеры отличаются следующими признаками:

- характером работы — обновление информационных выходов по уровню (одноктактный триггер) или по изменению (двухтактный триггер) тактового входа;
- наличием входа сброса и его типом — асинхронным или синхронным;

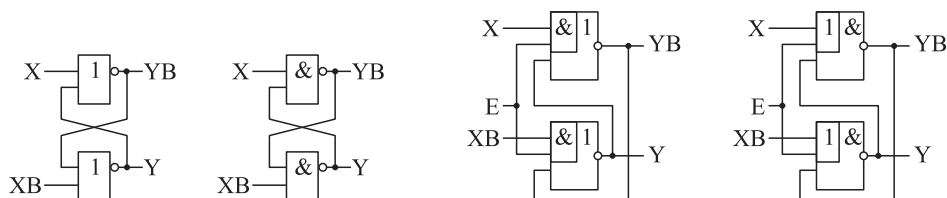


Рис. 1 Варианты БЯ

- наличием входа установки и его типом;
- наличием входа разрешения предустановки;
- наличием входа данных для параллельной записи и типом записи;
- наличием входа разрешения записи.

Признаки СС-триггера аналогичны признакам синхронных D-триггеров с заменой тактового входа фазовым входом управления, а синхронного типа сброса, установки и записи — самосинхронным. Следует отметить, что вход управления может отсутствовать, если информационный вход — это парафазный сигнал со спейсером. Информационным входом может служить унарный, парафазный со спейсером или бифазный сигнал [20].

Самосинхронный триггер обычно состоит из одной или двух бистабильных ячеек (БЯ), примеры которых показаны на рис. 1. В качестве компонента БЯ может использоваться любая комбинационная логическая ячейка. Обязательной составной частью СС-триггера служит индикаторный элемент, подтверждающий успешное завершение переключения всех элементов триггера в текущую фазу работы. Пример одноконтурного СС-триггера с парафазным информационным входом показан на рис. 2. Здесь (R, S) — парафазный информационный вход с нулевым спейсером; RT — вход асинхронного сброса; (Q, QB) — бифазный выход; I — индикаторный выход.

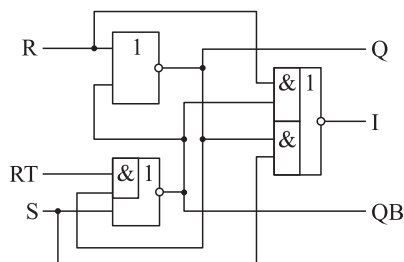


Рис. 2 Одноконтурный СС-триггер с парафазным входом и асинхронным сбросом

В индикаторной подсхеме СС-схем также широко используется гистерезисный триггер (Г-триггер, рис. 3).

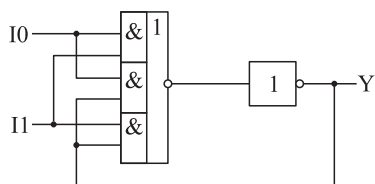


Рис. 3 Двухвходовый Г-триггер

Перечисленные в данном разделе признаки служат базовыми критериями

подбора СС-аналога для синхронного триггера. Кроме того, учитываются индивидуальные особенности СС-триггера и его окружение.

4 Функциональные особенности самосинхронных триггеров

Функциональные особенности СС-триггеров связаны с необходимостью индикации всех элементов схемы, типом СС-кодирования входов и выходов и структурной организацией СС-схемы. Они учитываются в процедуре десинхронизации синтезируемой схемы. Рассмотрим некоторые из них.

Управление СС-триггером. В синхронных триггерах режимом работы управляет тактовый сигнал. В СС-триггерах аналогичную роль играет фазовый сигнал управления. В комбинационных СС-схемах обычно используется парафазное со спейсером кодирование информационных сигналов, которое наделяет их признаком фазы: рабочей или спейсерной. Это свойство парафазного сигнала со спейсером избавляет от необходимости использовать фазовый вход управления. Тем не менее использование входа управления при наличии парафазного информационного входа целесообразно для организации конвейера. В этом случае сигнал управления формируется последующей частью СС-схемы на основе ее индикаторных сигналов.

Усиление сигнала управления. Большая нагрузка на входе управления внутри двухтактных СС-триггеров заставляет усиливать его дополнительным инвертором, выход которого может затем использоваться для ускорения запрос-ответного взаимодействия триггера с окружением. В некоторых случаях инверсия входа управления необходима для организации корректного взаимодействия с окружением, например в регистре сдвига. Рисунок 4 демонстрирует разряд регистра сдвига на двухтактном СС-триггере. Здесь ЕВ — инверсия входа управ-

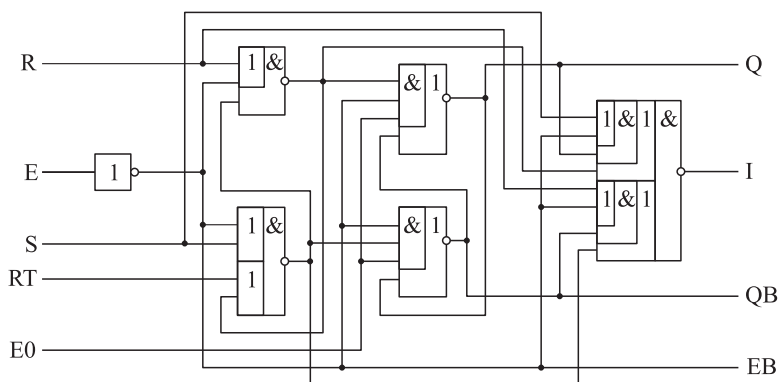


Рис. 4 Разряд регистра сдвига

ления E; E0 — дополнительный фазовый вход, подключаемый к выходу EB следующего разряда регистра.

Реализация входного интерфейса СС-схемы с синхронным окружением.

Для этой цели используется СС-триггер с унарным информационным входом, одноктактный вариант которого показан на рис. 5. Здесь D — унарный информационный вход; E — фазовый вход управления, формируемый источником информационного сигнала.

Реализация разряда регистра хранения с парафазным информационным входом. Рисунок 6 демонстрирует его схему на Г-триггерах, обозначенных символом «Н». Здесь (X, XB) — парафазный информационный вход; E — вход управления; (Y, YB) — парафазный выход; I — индикаторный выход. Такой регистр хранения используется в качестве регистра ступени СС-конвейера.

Самосинхронный сброс и СС-установка. Отличие СС-предустановки от асинхронной заключается в индицировании ее завершения. Оно усложняет схему триггера и требует организации сценария СС-предустановки: определение условия запуска СС-предустановки, прерывание штатной работы триггера, инициирование предустановки, подтверждение факта ее завершения и возврат к штатному режиму работы. На рис. 7 показан одноктактный СС-триггер, отличающийся от триггера на рис. 2 СС-сбросом (вход С).

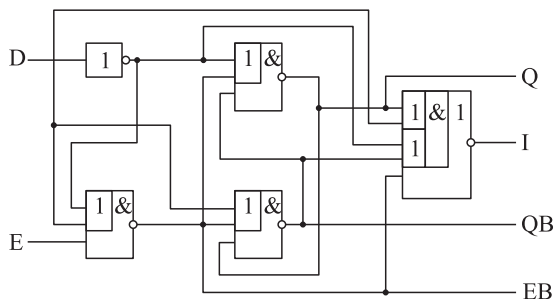


Рис. 5 Самосинхронный триггер с унарным входом

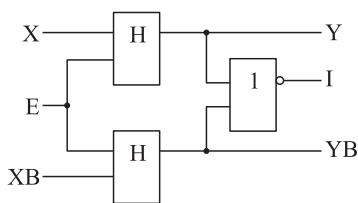


Рис. 6 Разряд СС-регистра хранения на Г-триггерах

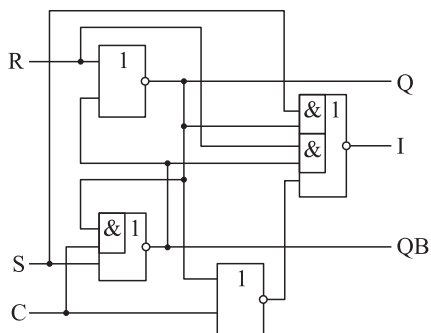


Рис. 7 Одноктактный СС-триггер с парафазным входом и СС-сбросом

Индивидуальные особенности СС-триггеров учитываются в процедуре десинхронизации синтезируемой схемы при замене синхронных триггеров соответствующими СС-триггерами с учетом их назначения и окружения.

5 Метод замены синхронного триггера самосинхронным вариантом

Предлагаемый метод замены синхронного триггера СС-вариантом заключается в подборе СС-аналога для каждого синхронного триггера в функционально-логическом описании синтезируемой схемы, полученном программой Yosys в результате преобразования исходного поведенческого описания схемы, с помощью таблицы соответствия. Фрагмент такой таблицы для библиотеки стандартных элементов семейства базовых матричных кристаллов 5503 [21] представлен ниже.

Соответствие СС-триггеров синхронным прототипам

Назначение	Характер работы		Сброс		Установка		Прото-тип	СС-ана-лог
	Одно-такт-ный	Двух-такт-ный	Асин-хрон-ный	Син-хрон-ный	Асин-хрон-ная	Син-хрон-ная		
1. Хранение	✓						LD	R0E10
2. Хранение	✓				✓		LDP	R1R11
3. Хранение		✓	✓				FDC	R1RE20
4. Сдвиг		✓	✓				FDCB	S0RRE0
5. Сдвиг		✓		✓		✓	FDRSB	S0RTE0
6. Сдвиг		✓	✓				FDC	S1RRE0
7. Сдвиг		✓		✓		✓	FDRS	S1RTE0
8. Разряд счетчика		✓	✓				FDC	C1C
9. Разряд счетчика		✓	✓		✓		FDCP	C0CP
10. Разряд счетчика		✓	✓				FDCB	C0CI

Одному синхронному триггеру может соответствовать несколько СС-аналогов в зависимости от назначения триггера и типа информационных входов и выходов, определяемого его источником.

Процедура замены состоит из следующих шагов.

1. Анализ состава входов триггера.
2. Определение его назначения (разряд регистра хранения, разряд регистра сдвига, разряд счетчика, триггер флага и т. д.) по его окружению.
3. Уточнение типа информационного входа и выхода.
4. Подбор СС-аналога из таблицы соответствия.

В некоторых случаях при замене допускается изменение типа триггера. Например, двухтактный синхронный триггер в качестве разряда регистра ступени конвейера заменяется разрядом регистра хранения на Г-триггерах (см. рис. 6)

вместо двухтактного СС-триггера. Окончательный выбор СС-аналога триггера делается после согласования типов спейсера его информационных и управляющих сигналов с их источниками в соответствии с дисциплиной функционирования СС-схем.

6 Заключение

Автоматизированный синтез СС-схемы на базе ее синхронного описания и системы логического синтеза Yosys для преобразования поведенческого описания синтезируемой схемы в систему логических функций и совокупность триггеров не требует от разработчика углубленных знаний теории СС-схем, ускоряет разработку САПР СС-схем и облегчает их проектирование.

Предложенный в статье метод замены синхронных триггеров СС-аналогами на основе таблицы их соответствия с учетом назначения и окружения триггера формализует и упрощает синтез СС-схем. Таблица соответствия формируется под конкретную библиотеку стандартных ячеек.

Дальнейшее направление исследования и решения проблемы синтеза СС-схем связано с разработкой методики построения последовательностных функциональных СС-устройств (регистров, счетчиков) на основе их исходного синхронного поведенческого описания.

Литература

1. *Kishinevsky M., Kondratyev A., Taubin A., Varshavsky V.* Concurrent hardware: The theory and practice of self-timed design. — New York, NY, USA: J. Wiley & Sons, 1994. 368 p.
2. *Zakharov V., Stepenkov Y., Diachenko Y., Rogdestvenski Y.* Self-timed circuitry retrospective // Conference (International) on Engineering Technologies and Computer Science Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020. P. 63–69. doi: 10.1109/EnT48576.2020.00018.
3. *Рождественский Ю. В., Морозов Н. В., Степченко Ю. А., Рождественские А. В.* Подсистема анализа самосинхронных логических схем АСИАН // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем. — М.: ИПИМ РАН, 2006. С. 158–162. EDN: LHPAHJ.
4. *Плеханов Л. П.* Реализация функционального метода анализа самосинхронности электронных схем // Системы и средства информатики, 2009. Т. 19. № 1. С. 142–148. EDN: MBCMTD.
5. *Рождественский Ю. В., Морозов Н. В., Рождественские А. В.* Подсистема событийного анализа самосинхронных схем АСПЕКТ // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. — М.: ИПИМ РАН, 2010. С. 26–31. EDN: MVWVBR.
6. *Bardsley A.* Balsa: An asynchronous circuit synthesis system: Master Thesis — Manchester, U.K.: University of Manchester, 1998. 162 p.
7. *Fuhrer R. M., Nowick S. M., Theobald M., Jha N. K., Lin B., Pandlana L.* Minimalist: An environment for the synthesis, verification and testability of burst-mode asynchronous machines. — New York, NY, USA: Columbia University, 1999. Technical Report TRUCS-020-99. 20 p. doi: 10.7916/D8WD4BQ9.

8. *Dindhuc A., Rigaud J.-B., Rezzag A., Sirianni A., Fragoso J. L., Fesquet L., Renaudin M.* TIMA asynchronous synthesis tools // Communication to ACID Workshop, 2002.
9. *Taubin A., Cortadella J., Lavagno L., Kondratyev A., Peeters A.* Design automation of real-life asynchronous devices and systems // Foundations Trends Electronic Design Automation, 2007. Vol. 2. No. 1. P. 1–133. doi:0.1561/1000000006.
10. *Poliakov I., Sokolov D., Mokhov A.* Workcraft: A static data flow structure editing, visualisation and analysis tool // Petri nets and other models of concurrency / Eds. J. Kleijn, A. Yakovlev. — Lecture notes in computer science ser. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. P. 505–514. doi: 10.1007/978-3-540-73094-1_30.
11. *Reese R. B., Smith S. C., Thornton M. A.* Uncle — an RTL approach to asynchronous design // 18th Symposium (International) on Asynchronous Circuits and Systems Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012. P. 65–72. doi: 10.1109/ASYNC.2012.14.
12. *Palangpour P.* CAD tools for synthesis of sleep convention logic: PhD Diss. — Fayetteville, AR, USA: University of Arkansas, 2013. 85 p. <http://scholarworks.uark.edu/etd/755>.
13. *Sparsø J., Furber S.* Principles of asynchronous circuit design: A systems perspective. — Kluwer Academic Publs., 2001. 337 p. doi: 10.1007/978-1-4757-3385-3.
14. *Blunno I., Lavagno L.* Automated synthesis of micro-pipelines from behavioral Verilog HDL // 6th Symposium (International) on Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems Proceedings. — Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 2000. P. 84–92. doi: 10.1109/ASYNC.2000.836967.
15. *Andrikos N., Lavagno L., Pandini D., Sotiriou C. P.* A fully-automated desynchronization flow for synchronous circuits // 44th ACM/IEEE Design Automation Conference Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007. P. 982–985.
16. *Zhou R., Chong K.-S., Gwee B.-H., Chang J. S.* Quasi-delay-insensitive compiler: Automatic synthesis of asynchronous circuits from verilog specifications // 54th Midwest Symposium (International) on Circuits and Systems. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011. Art. 6026577. 4 p. doi: 10.1109/MWSCAS.2011.6026577.
17. *Плеханов Л. П., Денисов А. Н., Дьяченко Ю. Г., Мамонов Д. И., Морозов Н. В., Степченко Д. Ю.* Реализация синтеза самосинхронных схем в базисе БМК // Наноиндустрия, 2021. Т. 14. № S7. С. 395–397. doi: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.395.397. EDN: TGPTHL.
18. *Денисов А. Н., Фомин Ю. П., Коняхин В. В., Фёдоров Р. А.* Библиотека функциональных ячеек для проектирования полузаказных микросхем серий 5503 и 5507. — М.: Техносфера, 2019. 317 с. https://www.technosfera.ru/files/book_pdf/0/book_324_977.pdf.
19. Yosys Open SYnthesis Suite. <https://yosyshq.net/yosys>.
20. *Плеханов Л. П.* Основы самосинхронных электронных схем. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 208 с.
21. *Степченко Ю. А., Денисов А. Н., Дьяченко Ю. Г. и др.* Библиотека функциональных ячеек для проектирования самосинхронных полузаказных БМК микросхем серий 5503/5507. — М.: Техносфера, 2017. Т. 4. 376 с.

Поступила в редакцию 22.05.23

REPLACING SYNCHRONOUS TRIGGERS WITH SELF-TIMED COUNTERPARTS DURING CIRCUIT DESYNCHRONIZATION

*Yu. A. Stepchenkov, D. Yu. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, N. V. Morozov,
and L. P. Plekhanov*

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

Abstract: Self-timed (ST) digital circuits have a number of advantages in comparison with synchronous counterparts and become a promising basis for the reliable computing systems implementation operating in extreme conditions. The lack of effective tools for automated synthesis of ST circuits convenient for use by developers trained in computer-aided design of the synchronous circuits significantly hinders the introduction of ST circuits into digital circuit development practice. The approach to the ST circuit synthesis based on the transformation of the original synchronous Verilog description of the circuit operation algorithm into the ST implementation according to formalized rules in automatic mode with minimal interactive participation of the developer provides a quick ST solution with acceptable characteristics and does not require deep knowledge of self-timing from the designer. It relies on the basic principles of ST circuits design and heuristic methods for their development. One of the important and controversial stages of ST circuit design in this approach is the replacement of synchronous latches and flip-flops by their ST counterparts. For this purpose, the authors propose to use the method of tabular formalized correspondence based on a ready-made library of ST latches and flip-flops and analysis of their environment.

Keywords: self-timed circuit; logic synthesis; trigger; Verilog; substitution; coincidence table

DOI: 10.14357/08696527230401

EDN: VPLSHI

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00237).

References

1. Kishinevsky, M., A. Kondratyev, A. Taubin, and V. Varshavsky. 1994. *Concurrent hardware: The theory and practice of self-timed design*. New York, NY: J. Wiley & Sons. 368 p.
2. Zakharov, V., Y. Stepchenkov, Y. Diachenko, and Y. Rogdestvenski. 2020. Self-timed circuitry retrospective. *Conference (International) Engineering Technologies and Computer Science Proceedings*. Moscow. 63–69. doi: 10.1109/EnT48576.2020.00018.
3. Rozhdestvenskiy, Yu. V., N. V. Morozov, Yu. A. Stepchenkov, and A. V. Rozhdestvenskene. 2006. Podsystema analiza samosinkhronnykh logicheskikh skhem ASIAN [ASIAN — subsystem of analysis of self-timed logical circuits]. *Problemy*

- razrabotki perspektivnykh mikroelektronnykh sistem [Problems of developing advanced microelectronic systems]. Moscow: IPPM RAN. 158–162. EDN: LHPAHJ.
4. Plekhanov, L. P. 2009. Realizatsiya funktsional'nogo metoda analiza samosinkhronnosti elektronnykh skhem [Realization of the functional methods of self-timed electronic circuits analysis]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 19(1):142–148. EDN: MBCMTD.
 5. Rozhdestvenskiy, Yu. V., N. V. Morozov, and A. V. Rozhdestvenskene. 2010. Podsystema sobytiynogo analiza samosinkhronnykh skhem ASPEKT [ASPECT — a subsystem of event analysis of self-timed circuits]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* [Problems of developing advanced micro- and nanoelectronic systems]. Moscow: IPPM RAN. 26–31. EDN: MVWVBR.
 6. Bardsley, A. 1998. Balsa: An asynchronous circuit synthesis system. Manchester, U.K.: University of Manchester. Master Thesis. 162 p.
 7. Fuhrer, R. M., S. M. Nowick, M. Theobald, N. K. Jha, B. Lin, and L. Pandlana. 1999. Minimalist: An environment for the synthesis, verification and testability of burst-mode asynchronous machines. New York, NY: Columbia University. Technical Report TRCUCS-020-99. 20 p. doi: 10.7916/D8WD4BQ9.
 8. Dindhuc, A., J.-B. Rigaud, A. Rezzag, A. Sirianni, J. L. Frago, L. Fesquet, and M. Renaudin. 2002. TIMA asynchronous synthesis tools. *Communication to ACID Workshop*.
 9. Taubin, A., J. Cortadella, L. Lavagno, A. Kondratyev, and A. Peeters. 2007. Design automation of real-life asynchronous devices and systems. *Foundations Trends Electronic Design Automation* 2(1):1–133. doi:0.1561/1000000006.
 10. Poliakov, I., D. Sokolov, and A. Mokhov. 2007. Workcraft: A static data flow structure editing, visualisation and analysis tool. *Petri nets and other models of concurrency*. Eds. J. Kleijn and A. Yakovlev. Lecture notes in computer science ser. Berlin, Heidelberg: Springer. 505–514. doi: 10.1007/978-3-540-73094-1_30.
 11. Reese, R. B., S. C. Smith, and M. A. Thornton. 2012. Uncle — an RTL approach to asynchronous design. *Symposium (International) on Asynchronous Circuits and Systems Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 65–72. doi: 10.1109/ASYNC.2012.14.
 12. Palangpour, P. 2013. CAD tools for synthesis of sleep convention logic. Fayetteville, AR: University of Arkansas. PhD Diss. 85 p. Available at: <http://scholarworks.uark.edu/etd/755> (accessed November 22, 2023).
 13. Sparsø, J., and S. Furber 2001. *Principles of asynchronous circuit design: A systems perspective*. Kluwer Academic Publs. 337 p. doi: 10.1007/978-1-4757-3385-3.
 14. Blunno, I., and L. Lavagno. 2000. Automated synthesis of micro-pipelines from behavioral Verilog HDL. *6th Symposium (International) on Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems Proceedings*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press. 84–92. doi: 10.1109/ASYNC.2000.836967.
 15. Andrikos, N., L. Lavagno, D. Pandini, and C. P. Sotiriou. 2007. A fully-automated desynchronization flow for synchronous circuits. *44th ACM/IEEE Design Automation Conference Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 982–985.
 16. Zhou, R., K.-S. Chong, B.-H. Gwee, and J. S. Chang. 2011. Quasi-delay-insensitive compiler: Automatic synthesis of asynchronous circuits from verilog specifications. *54th Midwest Symposium (International) on Circuits and Systems*. Piscataway, NJ: IEEE. Art. 6026577. 4 p. doi: 10.1109/MWSCAS.2011.6026577.
- 14 Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics 2023 vol 33 no 4

17. Plekhanov, L. P., A. N. Denisov, Yu. G. Diachenko, D. I. Mamonov, N. V. Morozov, and D. Yu. Stepchenkov. 2021. Realizatsiya sinteza samosinkhronnykh skhem v bazise BMK [Implementing self-timed circuits synthesis in gate array basis]. *Nanoindus-triya* [Nanoindustry] 14(S7):395–397. doi: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.395.397. EDN: TGPThL.
18. Denisov, A. N., Yu. P. Fomin, V. V. Konyakhin, and R. A. Fedorov. 2019. *Biblioteka funkcional'nykh yacheek dlya proektirovaniya poluzakaznykh mikroskhem seriy 5503 i 5507* [Function cell library for the design of semicustom integrated circuits of the 5503 and 5507 series]. Moscow: Tekhnosfera. 317 p. Available at: https://www.technosfera.ru/files/book_pdf/0/book_324_977.pdf (accessed November 22, 2023).
19. Yosys Open SYnthesis Suite. Available at: <https://yosyshq.net/yosys> (accessed October 23, 2023).
20. Plekhanov, L. P. 2013. *Osnovy samosinkhronnykh elektronnykh skhem* [Basics of self-timed electronic circuits]. Moscow: Binom. Laboratory of Knowledge. 208 p.
21. Stepchenkov, Yu. A., A. N. Denisov, Yu. G. Diachenko, et al. 2017. *Biblioteka funkcional'nykh yacheek dlya proektirovaniya samosinkhronnykh poluzakaznykh BMK mikroskhem seriy 5503/5507* [Library of functional cells for designing self-timed semicustom chips of the 5503 and 5597 series]. Moscow: Tekhnosfera. Vol. 4. 376 p.

Received May 22, 2023

Contributors

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

Stepchenkov Dmitri Y. (b. 1973) — senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; DStepchenkov@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

Morozov Nikolai V. (b. 1956) — senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; NMorozov@ipiran.ru

Plekhanov Leonid P. (b. 1943) — 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; lplekhanov@inbox.ru

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МЕТОДОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ РЕФЛЕКСИВНО-АКТИВНЫХ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ*

*С. В. Лисмонд*¹

Аннотация: Описываются элементы методологии построения рефлексивно-активных систем искусственных гетерогенных интеллектуальных агентов (РАСИГИА), а именно: ее характеристики и логическая структура, формирующие основу для построения ее темпоральной структуры (жизненного цикла). Искусственные гетерогенные интеллектуальные агенты рефлексивно-активных систем взаимно моделируют рефлексивные позиции друг друга, динамически вырабатывают тактики и стратегии своего поведения, релевантные моделям своих контрагентов, по мере необходимости в процессе решения проблем привлекают новых агентов из пула доступных агентов, построенных различными разработчиками, и исключают из своего состава существующих агентов, на лету перестраивая состав агентов и структуру связей между ними. Разработка таких систем для решения практических проблем позволит получить новые теоретические, методологические и технологические знания о коллективном интеллекте, повысить релевантность данных систем реальным коллективам специалистов, а также верифицировать знания о коллективных процессах и эффектах в малых группах.

Ключевые слова: рефлексия; методология; рефлексивно-активная система искусственных гетерогенных интеллектуальных агентов; гибридная интеллектуальная многоагентная система; коллектив специалистов

DOI: 10.14357/08696527230402

EDN: TRTNEI

1 Введение

Разработка интеллектуальных систем, учитывающих неоднородность, динамичность, комплексное строение, сетевой характер условий и целей решаемых практических проблем, — нетривиальная задача. Для этих целей предлагается новый класс интеллектуальных систем — рефлексивно-активные системы искусственных гетерогенных интеллектуальных агентов, создаваемые в рамках многоагентного подхода [1–4] на основе модели гибридных интеллектуальных многоагентных систем [5]. В настоящей работе рассматриваются вопросы создания методологии построения систем такого класса.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00218.

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ser-list-post@yandex.ru

Понятие «методология» имеет многозначный характер [6–10]: выделяют-ся дескриптивные, предполагающие ретроспективное описание осуществленных процессов деятельности, и нормативные, формирующие рекомендации для будущей деятельности, функции методологии, а также четыре уровня ее рассмотрения [6, 8]: философский, общенаучный, конкретно-научный и технологический (конкретные методики и техники исследования). В настоящей работе будем использовать определение методологии А. М. и Д. А. Новиковых, рассматривающих ее как учение об организации продуктивной деятельности в целостную систему с четко определенными характеристиками, логической структурой и процессом ее осуществления (темпоральной структурой) [8]. В настоящей работе рассматриваются характеристики (особенности и принципы) и логическая (субъект, объект, предмет, методы, средства, результат) структура методологии разработки РАСИГИА.

2 Характеристики методологии

Особенности проектирования РАСИГИА определяются классом и характеристиками проблем, для решения которых они предназначены. Практические исследования [5, 11, 12] таких проблем, возникающих при управлении объектами транспортной логистики, электроэнергетики, медицины и других областей, продемонстрировали их слабую формализацию, комплексное строение, неоднородность, сетевой характер условий и целей, существенную непрозрачность (неопределенность) и динамичность, что согласуется с работами [13, 14]. Таким образом, выделяются следующие особенности разработки РАСИГИА:

- ввиду слабой формализации процесс решения проблемы зачастую начинается с выработки ее формулировки, потому что изначально она может быть не определена, так же как и знания, необходимые для ее решения;
- существенная непрозрачность проблемы и хаотичность процессов не позволяют оперировать традиционными логическими и вероятностно-каузальными методами, в результате система поддержки решений должна работать в непредсказуемых на основе ретроспективных данных условиях [15];
- неоднородность, сетевой характер условий и целей предполагают необходимость объединения в единую систему методов различных технологий искусственного интеллекта и компьютерных моделей специалистов с разными взглядами на проблему и разными целями [16];
- динамичность следует учитывать на уровнях среды и проблемы. Динамичность среды, в которой существуют агенты системы, предполагает ограниченность времени на выработку решения проблемы в соответствии с некоторым методом или протоколом, т. е. их работу в режиме реального времени (мягкого или жесткого) [17]. Динамичность проблемы ограничивает время на построение метода ее решения и невозможность использования ранее выработанных методов в неизменном виде;

- комплексность приводит к необходимости исследования проблемы и проектирования системы на разных уровнях. Проблема представляет собой взаимосвязанную совокупность подпроблем и элементарных задач, которые могут образовывать иерархическую систему, причем свойства проблемы в целом определяются не только свойствами ее составных частей, но и связями между ними. Макроуровневые коллективные эффекты, определяющие свойства разрабатываемой системы, обеспечиваются путем проектирования элементарных функций агентов и, в свою очередь, зависят от характеристик среды РАСИГИА.

Эти особенности предопределяют принципы проектирования РАСИГИА, согласующиеся с принципами системного анализа, общей теории систем, синергетики и построения рефлексивно-активных сред инновационного развития:

- *принцип субъектно-ориентированной организации знаний*, согласно которому знания неотделимы от познающих субъектов, а общая картина мира формируется за счет сетевой организации их частных картин мира [18];
- *принцип неустойчивости*, предполагающий, что система в своем развитии при переходе от одного равновесного состояния к другому проходит через точки бифуркации (неустойчивости, неопределенности, хаоса), в которых осуществляется выбор дальнейшего пути ее развития, и незначительные по силе воздействия, в том числе информационные, могут существенно повлиять на ее судьбу [18, 19];
- *принцип открытости*, обеспечивающий приток новой информации, знаний и агентов в систему, сохранение порядка и ее эволюцию от простого к сложному [18];
- *принцип гомеостатичности*, обеспечивающий функционирование системы в некоторых рамках, которые позволяют ей следовать к своей цели, за счет наличия отрицательных обратных связей, подавляющих внешние возмущения [18];
- *принцип нелинейности*, который предполагает нарушение принципа суперпозиции в некотором явлении [18], например когда результат работы системы агентов превосходит результат работы тех же агентов, работающих порознь. Данный принцип наиболее выражен вблизи границ существования системы;
- *принцип необходимого разнообразия* [20], предполагающий, что для решения проблемы, которая обладает определенным, известным разнообразием (сложностью), требуется создание системы с еще большим разнообразием (наличием методов решения проблемы) или способной породить в себе необходимое разнообразие (вырабатывать релевантные методы решения проблемы) [8];
- *принцип полителичности*, в соответствии с которым решаемая РАСИГИА проблема затрагивает множество заинтересованных лиц с различными целями, и для выработки удовлетворяющей всех альтернативы их необходимо учитывать;

- *принцип согласования целей*, согласно которому цель функционирования РАСИГИА не должна противоречить цели вышестоящей системы;
- *принцип развития*, выступающий как общесистемная основа социальных сред, порождающих инновации, и заключающийся в изменениях системы с переходом ее в более жизнеспособное и релевантное существующим условиям состояние, осуществляемое в рамках соревновательности и отбора [18, 21]. Принцип развития связан с принципом открытости и позволяет РАСИГИА учитывать динамичный характер проблемы, подстраиваться к ней, сохраняя релевантность предлагаемых решений во времени;
- *принцип активности*, предполагающий, что агенты РАСИГИА — активные субъекты преобразования среды, в которой они обитают. Субъект выступает как детерминанта осуществляемых им изменений в мире (активность), обладающий самостоятельностью (автономностью), способностью к самодетерминации (саморегуляции, самоорганизации) и самосовершенствованию [18]. Отдельно следует выделить надситуативную активность как способность субъекта подниматься над уровнем требований ситуации, ставить цели, избыточные с точки зрения исходной задачи [22]. При этом выделяются различные формы активности, например деятельность, коммуникация и рефлексия [18];
- *принцип рефлексивности* как способ построения агентами собственных моделей мира (проблемы, других агентов системы и себя самого). Под рефлексией понимается способность агентов строить модели себя и других агентов или систем и одновременно «видеть» себя строящими такие модели [18]. Рефлексия моделирует реальность, превращая ее в воображаемую реальность;
- *принцип двойного субъекта*, определяющий процедуру рефлексивного согласования во взаимодействии субъектов (агентов или РАСИГИА в целом как распределенного субъекта): для обеспечения взаимопонимания субъекты адекватно представляют моделируемые ими в рамках конкретного взаимодействия субъектные позиции и реальности [18];
- *принцип эмерджентности*, согласно которому РАСИГИА обладает свойствами большими, чем сумма агентов, входящих в нее [8];
- *принцип иерархичности*, определяющий составную природу элементов вышестоящих уровней иерархии относительно более низких [18]. Агенты, включаясь в состав РАСИГИА, передают ей часть собственных функций и степеней свободы, которые становятся свойствами РАСИГИА в целом или параметрами порядка, следуя Г. Хакену. Эти параметры порядка на более высоком уровне иерархии описывают в сжатой форме функционал и цели-аттракторы системы, «дирижируя» синхронным поведением агентов более низкого уровня.

3 Логическая структура методологии

Логическая структура методологии построения РАСИГИА предполагает спецификацию ее субъекта, объекта, предмета, методов, средств и результата. Субъект данной методологии — коллектив разработчиков РАСИГИА в лице его руководителя. Организуемая деятельность (объект) — проектирование интеллектуальных систем для решения практических проблем или класса проблем путем моделирования коллективной работы специалистов под руководством лица, принимающего решения. Предмет — разработка методов и моделей РАСИГИА для решения поставленной проблемы.

При разработке РАСИГИА применяется широкий спектр методов системного анализа для формализации возникшей проблемы и проектирования системы:

- анализ документов, например инструкций по выполнению работ, должностных инструкций, бланков документов, информации для клиентов о работе компании, описания информационных систем и других, позволяющих получить общую картину работы организации [23];
- интервьюирование — метод исследования, обеспечивающий получение информации путем непосредственного общения в устной форме, в ходе которого происходит фиксация и анализ ответов на вопросы и невербального поведения собеседника [24]. Основные элементы данного метода — планирование интервью, беседа и ее регистрация [23];
- анкетирование — исследовательский метод опроса для выявления точек зрения и тенденций в группе респондентов на основе их письменных ответов на предложенные вопросы [25, 26]. Он используется для получения конкретного вида информации о проблеме и проблемной ситуации в отдельных случаях, например для проверки результатов обследования, полученных другими методами, так как для составления качественной анкеты, заполняемой большим числом опрашиваемых, аналитику необходимо хорошо разобраться в теме [23];
- анализ стейкхолдеров — деятельность по выявлению групп людей, способных повлиять на решение проблемы, проектирование системы или эффективность ее функционирования, осуществляемая для всестороннего рассмотрения проблемы, учета интересов всех лиц, затрагиваемых разработкой и внедрением РАСИГИА. В рамках этого метода может использоваться матрица А. Менделоу «влияние–значимость», модель Митчелла–Агле–Вуда, модель Г. Саважа [27];
- дерево целей — метод структурирования целей построения системы по иерархическому принципу, в рамках которого выделяется главная цель и подчиненные ей подцели первого, второго и последующего уровней [28]. Цели, структурированные с помощью данного метода, формируют граф типа «дерево», корень которого — главная цель (идеал), узлы — подчиненные цели, а ребра — дуги, представляющие отношение «быть частью»;

- наблюдение — важный источник информации, представляющий собой пассивный эксперимент для уточнения специфики протекания интересующего процесса [23], например работы коллектива специалистов над решением поставленной проблемы. В результате у аналитика формируется представление о реальном порядке выполнения исследуемых операций, а не о том, как они должны выполняться;
- моделирование — создание набора моделей интересующих объектов, отражающих их основные свойства, состав, структуру и информационные потоки [23]. В частности, в рамках методологии разрабатываются концептуальные модели проблемы коллектива, проектируемой РАСИГИА.

При построении моделей и взаимодействии со специалистами следует активно применять графическое представление информации, так как это существенно облегчает ее восприятие человеком и поиск возможных неточностей. При этом важно без ошибок перенести информацию со схем, графиков и диаграмм в форму, обеспечивающую ее компьютерную интерпретацию. Для этих целей предлагается использование визуального метаязыка [29], обеспечивающего однозначное отображение графического представления разрабатываемых моделей в формальное символическое представление.

Проектирование и реализация РАСИГИА основаны на агентно-ориентированном подходе, который предполагает большую автономность агентов по сравнению с объектами в традиционном объектно-ориентированном программировании. По сравнению с объектом агент имеет контроль не только над своим состоянием, но и над поведением [30]. Агенты, в отличие от объектов, обладают такими интегрированными свойствами, как реактивность, проактивность, социальность и т. д. Кроме того, многоагентные системы изначально предполагают высокую степень распределенности вычислений и их параллелизма. При построении агентов в их составе может использоваться широкий спектр вычислительных методов и технологий искусственного интеллекта, требуемых для создания коллективного, интегрированного метода решения поставленной сложной проблемы, например: алгебраические уравнения, метод Монте-Карло, продукционные экспертные системы, системы нечеткого вывода, искусственные нейронные сети, методы роевого интеллекта и др.

Средство для реализации РАСИГИА в рамках данной методологии — платформа многоагентного программирования JaCaMo [31]. Эта платформа интегрирует агентно-, организационно- и средо-ориентированные подходы к построению многоагентных систем, охватывая все уровни абстракции, требуемые для разработки РАСИГИА. Для тонкой настройки механизмов платформы и программирования отдельных элементов системы применяется язык Java и другие интегрируемые с ним языки.

Основной результат выполнения работ по данной методологии — программная реализация РАСИГИА, обеспечивающая решение поставленной проблемы. Кроме того, методология предполагает протоколирование выполняемых

разработчиками действий с их последующим анализом на завершающем этапе, выработкой предложений по корректировке методологии или формирования ее новой версии как дополнительного результата.

4 Заключение

Разработаны такие элементы методологии построения РАСИГИА, как характеристики и логическая структура. В частности, определены особенности и принципы организации деятельности по разработке таких систем, ее субъект, объект, предмет, методы, средства, результат. Темпоральная структура методологии построения РАСИГИА — предмет дальнейшей разработки. Предлагаемая методология упорядочивает продуктивную деятельность разработчиков в целостную систему, позволяющую проектировать РАСИГИА для решения поставленной проблемы. Данная методология предполагает системный анализ возникшей проблемы и проблемной ситуации, а основной результат выполнения работ в соответствии с ней — программная реализация РАСИГИА. Предлагаемая методология допускает ее развитие с каждой реализованной РАСИГИА, что позволяет ей агрегировать новые подходы к проектированию и реализации интеллектуальных информационных систем и практике решения проблем коллективами специалистов.

Литература

1. *Хорошевский В. Ф.* Поведение интеллектуальных агентов: модели и методы реализации // 4-й Междунар. семинар по прикладной семиотике, семиотическому и интеллектуальному управлению: Сб. научных трудов. — Переславль-Залесский: РАИИ, 1999. С. 5–20.
2. *Тарасов В. Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. 348 с.
3. *Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В.* Инструментальные средства для открытых сетей агентов // Известия РАН. Теория и системы управления, 2008. № 3. С. 106–124.
4. *Wooldridge M.* An introduction to multiagent systems. — New York, NY, USA: Wiley, 2009. 461 p.
5. *Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В.* Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. — М.: ИПИ РАН, 2014. 189 с.
6. *Юдин Э. Г.* Методология науки. Системность. Деятельность. — М.: Эдиториал УРСС, 1997. 444 с.
7. *Кохановский В. П., Золотухина Е. В., Лешкевич Т. Г., Фатхи Т. Б.* Философия для аспирантов. — Ростов н/Д: Феникс, 2003. 448 с.
8. *Новиков А. М., Новиков Д. А.* Методология. — М.: Синтег, 2007. 668 с.
9. *Афанасьев В. В.* Методология и методы научного исследования. — М.: МГПУ, 2015. 178 с.

10. *Манушин Д. В.* Уточнение понятия «методология» // *Финансы и кредит*, 2015. № 41. С. 50–66. EDN: UNXSTV.
11. *Кириков И. А., Колесников А. В., Листопад С. В., Румовская С. Б.* «Виртуальный консилиум» — инструментальная среда поддержки принятия сложных диагностических решений // *Информатика и её применения*, 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 81–90. doi: 10.14357/19922264160311.
12. *Колесников А. В., Листопад С. В.* Модель гибридной интеллектуальной много-агентной системы гетерогенного мышления для информационной подготовки оперативных решений в региональных электрических сетях // *Системы и средства информатики*, 2018. Т. 28. № 4. С. 31–41. doi: 10.14357/08696527180404.
13. *Спирidonov В. Ф.* Психология мышления: Решение задач и проблем. — М.: Генезис, 2006. 319 с.
14. *Нариньяни А. С.* Инженерия знаний и НЕ-факторы: краткий обзор-08 // *Вопросы искусственного интеллекта*, 2008. № 1. С. 61–77.
15. *Авдеева З. К., Райков А. Н., Бауэр В. П., Сильвестров С. Н., Славин Б. Б., Зацаринный А. А., Колин К. К., Лепский В. Е., Малинецкий Г. Г.* Система распределенных ситуационных центров развития для устойчивого стратегического управления // *Рефлексивные процессы и управление: Сб. мат-лов 12-го Междунар. научн.-практич. междисциплинарного симпозиума.* — М.: Когито-Центр, 2019. С. 256–260. EDN: WWYXDA.
16. *Листопад С. В.* Функциональная структура сплоченной гибридной интеллектуальной многоагентной системы // *Системы и средства информатики*, 2020. Т. 30. № 2. С. 78–88. doi: 10.14357/08696527200208.
17. *Фоминых И. Б., Алексеев Н. П.* Управление познавательным процессом когнитивного агента в условиях временных ограничений // *Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Мат-лы 5-й Всеросс. Поспеловской конференции с международным участием.* — Калининград: БФУ им. И. Канта, 2020. С. 101–107. EDN: PSKSUD.
18. *Лепский В. Е.* Рефлексивно-активные среды инновационного развития. — М.: Когито-Центр, 2010. 255 с.
19. *Князева Е. Н.* Методология организации активных инновационных сред // *Организация саморазвивающихся инновационных сред.* — М.: Когито-Центр, 2012. С. 48–59.
20. *Эшби У. Р.* Введение в кибернетику / Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1959. 432 с. (*Ashby W. R.* An introduction to cybernetics. — London: Chapman and Hall Ltd., 1956. 304 p.)
21. *Поляков В. И.* Экзамен на «Homo Sapiens-II». От концепций естествознания XX века — к естествопониманию. — М.: РАЕН, 2008. 596 с.
22. *Психология: Словарь* / Под ред. А. В. Петровского, М. Г. Ярошевского. — М.: Политиздат, 1990. 494 с.
23. *Липунов Ю. П.* Управление процессами. Методы управления предприятием с использованием информационных технологий. — Саратов: Профобразование, 2019. 224 с.
24. *Кельмансон И. А.* Методология исследования в клинической психологии. — СПб.: СпецЛит, 2017. 328 с.
25. *Педагогический словарь* / Под ред. В. И. Загвязинского, А. Ф. Закировой. — М.: Академия, 2008. 352 с.

26. Долженко Ю. Ю., Позднякова А. С. Онлайн анкетирование как современный и эффективный способ исследования // Транспортное дело России, 2015. № 1. С. 109–110. EDN: TXTUVR.
27. Галимзянов М. Д. Методики анализа стейкхолдеров проекта // Молодой учёный, 2019. № 35(273). С. 35–37. EDN: KQXR VX.
28. Райзберг Б. А., Лозовский Л. Ш., Стародубцева Е. Б. Современный экономический словарь. — М.: ИНФРА-М, 1998. 476 с.
29. Колесников А. В., Листопад С. В., Румовская С. Б., Данишевский В. И. Неформальная аксиоматическая теория ролевых визуальных моделей // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 4. С. 114–120. doi: 10.14357/19922264160412.
30. Смирнов С. С., Смольянинова В. А. Введение в разработку многоагентных систем в среде Jason. Основы программирования на языке AgentSpeak. — М.: МИРЭА, 2009. 136 с.
31. Boissier O., Bordini R. H., Hubnerand J., Ricci A. Multi-agent oriented programming: Programming multi-agent systems using JaCaMo. — Intelligent robotics and autonomous agents ser. — Cambridge: The MIT Press, 2020. 264 p.

Поступила в редакцию 04.09.23

CHARACTERISTICS AND LOGICAL STRUCTURE OF THE METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING REFLEXIVE-ACTIVE SYSTEMS OF ARTIFICIAL HETEROGENEOUS INTELLIGENT AGENTS

S. V. Listopad

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

Abstract: The paper describes the elements of the methodology for constructing reflexive-active systems of artificial heterogeneous intelligent agents, namely, its characteristics and logical structure that form the basis for constructing of its temporal structure (life cycle). Artificial heterogeneous intelligent agents of reflexive-active systems mutually model each other’s reflexive positions, dynamically develop tactics and strategies of their behavior relevant to the models of their counterparties, as necessary, in the process of solving problems, attract new agents from the pool of available agents built by various developers, and exclude existing agents from their composition, rebuilding “on the fly” the composition of agents and the structure of connections between them. The development of such systems for solving practical problems will provide new theoretical, methodological, and technological knowledge about collective intelligence, increase the relevance of these systems to real teams of specialists, and verify the knowledge about collective processes and effects in small groups.

Keywords: reflection; methodology; reflexive-active system of artificial heterogeneous intelligent agents; hybrid intelligent multi-agent system; team of specialists

DOI: 10.14357/08696527230402

EDN: TRTHEI

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-21-00218.

References

1. Khoroshevskiy, V. F. 1999. Povedenie intellektual'nykh agentov: modeli i metody realizatsii [The behavior of intelligent agents: Models and methods of implementation]. *4-y Mezhdunar. seminar po prikladnoy semiotike, semioticheskomu i intellektual'nomu upravleniyu: Sb. nauchn. tr.* [4th Workshop (International) on Applied Semiotics, Semiotics and Intelligent Management Proceedings]. Pereslavl-Zalessky: RAAI. 5–20.
2. Tarasov, V. B. 2002. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nykh organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multiagent systems to intelligent organizations: Philosophy, psychology, and informatics]. Moscow: Editorial URSS. 352 p.
3. Gorodetskii, V. I., O. V. Karsaev, V. V. Samoilov, and S. V. Serebryakov. 2008. Development tools for open agent networks. *J. Comput. Sys. Sc. Int.* 47:429–446. doi: 10.1134/S1064230708030131.
4. Wooldridge, M. 2009. *An introduction to multiagent systems*. New York, NY: Wiley. 461 p.
5. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, and S. V. Listopad. 2014. *Gibridnye intellektual'nye sistemy s samoorganizatsiyey: koordinatsiya, soglasovannost', spor* [Hybrid intelligent systems with self-organization: Coordination, consistency, and dispute]. Moscow: IPI RAN. 189 p.
6. Yudin, E. G. 1997. *Metodologiya nauki. Sistemnost'. Deyatel'nost'* [Methodology of science. Consistency. Activity]. Moscow: Editorial URSS. 444 p.
7. Kokhanovskiy, V. P., E. V. Zolotukhina, T. G. Leshkevich, and T. B. Fatkhi. 2003. *Filosofiya dlya aspirantov* [Philosophy for graduate students]. Rostov-on-Don: Feniks. 448 p.
8. Novikov, A. M., and D. A. Novikov. 2007. *Metodologiya* [Methodology]. Moscow: SINTEG. 668 p.
9. Afanas'yev, V. V. 2015. *Metodologiya i metody nauchnogo issledovaniya* [Methodology and methods of scientific research]. Moscow: MGPU. 178 p.
10. Manushin, D. V. 2015. Utochnenie ponyatiya “metodologiya” [Refinement of the concept of methodology]. *Finansy i kredit* [Finance and Credit] 41:50–66. EDN: UNXSTV.
11. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, S. V. Listopad, and S. B. Rumovskaya. 2016. “Virtual'nyy konsilium” — instrumental'naya sreda podderzhki prinyatiya slozhnykh diagnosticheskikh resheniy [“Virtual council” — source environment supporting complex diagnostic decision making]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(3):81–90. doi: 10.14357/19922264160311.

12. Kolesnikov, A. V., and S. V. Listopad. 2018. Model' gibridnoy intellektual'noy mnogoagentnoy sistemy geterogenogo myshleniya dlya informatsionnoy podgotovki operativnykh resheniy v regional'nykh elektricheskikh setyakh [Model of a hybrid intelligent multiagent system of heterogeneous thinking for preparation of information about operational decisions in a regional power system]. *Sistemy i sredstva informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(4):31–41. doi: 10.14357/08696527180404.
13. Spiridonov, V. F. 2006. *Psikhologiya myshleniya: Reshenie zadach i problem* [Psychology of thinking: Solving tasks and problems]. Moscow: Genesis. 319 p.
14. Narinyani, A. S. 2008. Inzheneriya znaniy i NE-factory: kratkiy obzor-08 [Knowledge engineering and non-factors: A brief overview-08]. *Voprosy iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence Issues] 1:61–77.
15. Avdeeva, Z. K., A. N. Raykov, V. P. Bauer, S. N. Silvestrov, B. B. Slavin, A. A. Zatsarinnyy, K. K. Kolin, V. E. Lepskiy, and G. G. Malinetskiy. 2019. Sistema raspredelennykh situatsionnykh tsentrov razvitiya dlya ustoychivogo strategicheskogo upravleniya [The system of distributed situational development centers for sustainable strategic management]. *Sb. mat-lov 12-go Mezhdunar. nauchn.-praktich. mezhdistsiplinarnogo simpoziuma “Refleksionnye protsessy i upravlenie”* [12th Scientific and Practical Interdisciplinary Symposium (International) “Reflexive Processes and Management” Proceedings]. Moscow: Cogito-Centre. 256–260. EDN: WWYXDA.
16. Listopad, S. V. 2020. Funktsional'naya struktura splochennoy gibridnoy intellektual'noy mnogoagentnoy sistemy [Functional structure of the cohesive hybrid intelligent multiagent system]. *Sistemy i sredstva informatiki — Systems and Means of Informatics* 30(2):78–88. doi: 10.14357/08696527200208.
17. Fominykh, I. B., and N. P. Alekseev. 2020. Upravlenie poznavatel'nym protsessom kognitivnogo agenta v usloviyakh vremennykh ogranicheniy [Management of the cognitive process of a cognitive agent under time constraints]. *Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy: Mat-ly V Vseross. Pospelovskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Hybrid and Synergistic Intelligent Systems: 5th All-Russian Pospelov's Conference with International Participation Proceedings]. Kaliningrad: IKBFU Publ. 101–107. EDN: PSKSUD.
18. Lepskiy, V. E. 2010. *Refleksivno-aktivnye sredy innovatsionnogo razvitiya* [Reflexive-active environments of innovative development]. Moscow: Cogito-Centre. 255 p.
19. Knyazeva, E. N. 2012. Metodologiya organizatsii aktivnykh innovatsionnykh sred [Methodology for organizing active innovation environments]. *Organizatsiya samorazvivayushchikhsya innovatsionnykh sred* [Organization of self-developing innovation environments]. Moscow: Cogito-Centre. 48–59.
20. Ashby, W. R. 1956. *An introduction to cybernetics*. London: Chapman and Hall Ltd. 304 p.
21. Polyakov, V. I. 2008. *Ekzamen na “Homo Sapiens-II”. Ot kontseptsiy estestvoznaniya XX veka — k estestvoponimaniyu* [Exam for “Homo Sapiens-II”. From the concepts of natural science of the 20th century to natural understanding]. Moscow: Russian Academy of Natural Sciences. 596 p.
22. Petrovskiy, A. V., and M. G. Yaroshevsky, eds. 1990. *Psikhologiya: Slovar'* [Psychology: Dictionary]. Moscow: Politizdat. 494 p.
23. Lipuntsov, Yu. P. 2019. *Upravlenie protsessami. Metody upravleniya predpriyatiem s ispol'zovaniem informatsionnykh tekhnologiy* [Management of processes. Methods of

- enterprise management with the use of information technology]. Saratov: Profobrazovanie. 224 p.
24. Kelmanson, I. A. 2017. *Metodologiya issledovaniya v klinicheskoy psikhologii* [Methodology of research in clinical psychology]. Saint Petersburg: SpetsLit. 328 p.
 25. Zagvyazinsky, V. I., and A. F. Zakirova, eds. 2008. *Pedagogicheskiy slovar* [Pedagogical dictionary]. Moscow: Academy. 352 p.
 26. Dolzhenko, Yu. Yu., and A. S. Pozdnyakova. 2015. Onlayn anketirovanie kak sovremennyy i effektivnyy sposob issledovaniya [Online questionnaire survey as a modern and effective way of research]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport Business of Russia] 1:109–110. EDN: TXTUVR.
 27. Galimzyanov, M. D. 2019. Metodiki analiza steykholderov proekta [Methods for analyzing project stakeholders]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist] 35(273):35–37. EDN: KQXR VX.
 28. Rayzberg, B. A., L. Sh. Lozovskiy, and E. B. Starodubtseva. 1998. *Sovremennyy ekonomicheskii slovar'* [Modern economic dictionary]. Moscow: INFRA-M. 476 p.
 29. Kolesnikov, A. V., S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and V. I. Danishevskiy. 2016. Neformal'naya aksiomaticheskaya teoriya rolevykh vizual'nykh modeley [Informal axiomatic theory of the role visual models]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(4):114–120. doi: 10.14357/19922264160412.
 30. Smirnov, S. S., and V. A. Smol'yaninova. 2009. *Vvedenie v razrabotku mnogoagentnykh sistem v srede Jason. Osnovy programmirovaniya na yazyke AgentSpeak* [Introduction to the development of multiagent systems in the Jason environment. Fundamentals of programming in the AgentSpeak language]. Moscow: MIREA. 136 p.
 31. Boissier, O., R. H. Bordini, J. Hubnerand, and A. Ricci. 2020. *Multi-agent oriented programming: Programming multi-agent systems using JaCaMo*. Intelligent robotics and autonomous agents ser. Cambridge: The MIT Press. 264 p.

Received September 4, 2023

Contributor

Listopad Sergey V. (b. 1984)— 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; ser-list-post@yandex.ru

АВТОМАТНЫЕ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СБОЕВ И САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ

*А. А. Грушо¹, Н. А. Грушо², М. И. Забейайло³, В. О. Писковский⁴,
Д. В. Смирнов⁵, Е. Е. Тимонина⁶*

Аннотация: При проведении анализа информационной безопасности часто говорится об ущербах, полученных от атак компьютерных систем и информационных ресурсов, но мало уделяется внимания тому, как враждебные атаки и порождаемые ими сбои влияют на бизнес-процессы (БП) и формируют серьезные угрозы деятельности бизнес-систем в целом. Идея террористов — малое воздействие влечет большой ущерб — отражает основную цель враждебного воздействия на бизнес-систему. При изучении проблем распространения сбоев и враждебных воздействий основную роль играют зависимости в бизнес-системе и причинно-следственные связи. Для моделирования процессов взаимодействия подсистем бизнес-системы выбраны конечные автоматы. Построен механизм восстановления работы подсистемы после сбоя. В причинно-следственной схеме построена модель распространения сбоя при наличии механизма восстановления каждого автомата после сбоя. Показано, что, несмотря на быстрое восстановление после сбоя, для каждой подсистемы большой системы возможно возникновение глобального сбоя за счет рассинхронизации или за счет появления слишком больших очередей у критических элементов управления.

Ключевые слова: информационная безопасность; распространение сбоя; причинно-следственные связи; автоматная модель представления систем

DOI: 10.14357/08696527230403

EDN: SIGQOC

1 Введение

Для успеха в конкурентной борьбе критически важно обладать определенными преимуществами. Получить конкурентные преимущества позволяет реали-

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

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

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, m.zabehailo@yandex.ru

⁴Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, vrvr80@yandex.ru

⁵ПАО Сбербанк России, dvlsmirnov@sberbank.ru

⁶Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, eltimon@yandex.ru

зация индустриального подхода в бизнесе, в основе которого должны быть новые технологии организации массового производства товаров и услуг. В связи с этим увеличивается роль технологий автоматизации производственных процессов, ориентированность на инновации, опора на передовые компетенции сложенных команд специалистов-исполнителей, использование перспективных технологий управления производством и процессами его модернизации. При этом перечисленные характеристики проявляются во взаимосвязи, т. е. единым комплексом. Именно такая целостная комбинация свойств гарантирует формирование искомого нового качества у объекта или явления, требуемых в конкурентной борьбе.

Основой описания деятельности любого предприятия служит понятие бизнес-процесса. Бизнес-процесс определяется как «логически завершенная цепочка взаимосвязанных и взаимодействующих повторяющихся видов деятельности (действий, бизнес-функций, работ), в результате которых ресурсы предприятия используются для переработки объекта (физически или виртуально) с целью достижения определенных измеримых результатов или создания продукции для удовлетворения внутренних или внешних потребителей — клиентов. В качестве клиента БП может выступать другой БП. В цепочку БП входят операции, которые выполняются по определенным бизнес-правилам различными элементами организационной структуры предприятия. Под бизнес-правилами понимают способы реализации бизнес-функций в рамках БП, а также характеристики и условия выполнения БП» [1]. Удобно рассматривать любое предприятие как совокупность БП.

Структурное описание предприятия и его окружения (инфраструктуры) определяется наличием и взаимозависимостью трех базовых уровней представления архитектуры:

- (1) архитектуры БП;
- (2) архитектуры прикладных программных систем;
- (3) системно-технической архитектуры, которая состоит из компьютерного, коммуникационного и вспомогательного инженерного оборудования, обеспечивая архитектуру БП и программные системы.

Повышение конкурентоспособности бизнеса и повышение его прибыльности — это одна сторона медали. Другая сторона медали — риски ущербов, связанных с усложнением организации управления и повышенным доверием к комплексной автоматизации производственных процессов. В настоящее время принята следующая классификация рисков порождения ущербов деятельности бизнес-систем:

- риски стихийных бедствий, порождающих ущербы предприятию;
- риски техногенных катастроф, порождающих ущербы производственной и управленческой деятельности;

- риски враждебной деятельности конкурентов или преступных организаций и отдельных лиц.

При проведении анализа информационной безопасности часто говорится об ущербах, полученных от атак компьютерных систем и информационных ресурсов, но мало уделяется внимания тому, как враждебные атаки и порождаемые ими сбои влияют на БП и формируют серьезные угрозы деятельности бизнес-систем в целом. Идея террористов — малое воздействие влечет большой ущерб — отражает основную цель враждебного воздействия на БП предприятия. Однако необходимо понимать механизмы такого глубокого воздействия. Эти механизмы не всегда очевидны, но, в отличие от необразованных «террористов», умные конкуренты и другие серьезные враждебные силы проводят глубокий анализ распространения сбоев и атак, позволяющих получить конкурентное преимущество или даже уничтожение конкурента. Всегда для такого анализа требуется погружение БП предприятия и его окружения в некоторую общую среду, через которую осуществляются все взаимодействия и воздействия. Эту среду называют инфраструктурой.

Формально инфраструктура определена как сеть систем и процессов, которые взаимодействуют синергетически, чтобы производить продукцию и услуги [2]. В этом определении указано важнейшее свойство взаимозависимости, которое несет как положительный смысл с точки зрения организации производства, так и основную уязвимость, состоящую в поражении одних свойств через сбои и нарушения других.

Зависимость — это связь или соединение между двумя подсистемами или процессами инфраструктуры, через которые состояние одной влияет на состояние другой или коррелирует с ним.

Взаимозависимости — это сложные отношения, которые характеризуются множественными связями между элементами инфраструктуры, включая обратные связи и обратные пути в разветвленной топологии. Взаимозависимости создают сложное полотно, которое, учитывая особенности его различных типов связей, может передавать удары по всему широкому спектру экономической деятельности инфраструктуры. При этом адекватно проанализировать или понять все пути нанесения ущерба невозможно.

В литературе [3] можно найти классификацию основных направлений, позволяющих проводить идентификацию, понимание и анализ взаимозависимостей в сложных инфраструктурах.

Подсистемы инфраструктуры *физически* взаимозависимы, если состояние каждой зависит от материального выхода других.

Элементы инфраструктуры имеют *киберзависимость*, если их состояния зависят от информации, передаваемой через инфраструктуру.

Элементы инфраструктуры *географически* взаимозависимы, если локальное событие может создать изменения состояния в них.

Два элемента инфраструктуры *логически* взаимозависимы, если состояние каждого зависит от состояния другого через механизм, который не является физической, кибернетической или географической связью (например, забастовка двух предприятий по причине малой зарплаты).

Очевидно, что передача сбоя от одной подсистемы инфраструктуры к другой подсистеме возможна только при наличии зависимости. Это условие необходимо, но недостаточно для распространения сбоя или другого враждебного воздействия.

Обычно отказы или сбои, связанные с инфраструктурой, классифицируются как каскадные, эскалационные или имеющие общие причины [3]. Эти отказы принципиально отличаются от сбоев, ограниченных одним элементом, учитывая, что взаимозависимости необходимы для генерации или распространения этих типов отказов.

Каскадный сбой возникает, когда отказ в одной подсистеме инфраструктуры вызывает отказ компонента во второй подсистеме, что впоследствии вызывает нарушение в работе следующей взаимосвязанной подсистемы или подсистем.

Эскалационный сбой возникает, когда при существующем прерывании в одной подсистеме усиливается независимо нарушение работы второй подсистемы, как правило, в виде увеличения серьезности или требуемого времени восстановления или восстановления после второй неисправности.

Отказ по общей причине происходит, когда одновременно нарушаются два и более инфраструктурных элемента: компоненты в каждой подсистеме отказывают из-за некоторых общих причин. Элементы из нескольких подсистем инфраструктуры могут быть затронуты одновременно либо потому, что они занимают одно и то же физическое пространство (географическая зависимость), либо потому, что корневая проблема широко распространяется (стихийное бедствие, техногенная катастрофа, террористический акт).

Второй после зависимости важнейшей компонентой, которая нужна для распространения сбоев и враждебных воздействий, является причинно-следственная связь.

Каждое состояние исходной подсистемы может стать причиной появления одного или нескольких следствий в зависимой от нее подсистеме [4, 5]. Использование причинно-следственных связей в анализе распространения сбоев и враждебных воздействий основано на двух свойствах причин и следствий. Первое свойство состоит в том, что появление причины детерминированно влечет появление следствия в случае наличия связи причины с пространством, в котором может возникнуть следствие. Второе свойство означает, что нет событий, появление которых не имеет причин. Если причина искажена, то ожидаемое следствие либо не возникает, либо обусловлено другими причинами.

Поскольку сбои или другие враждебные события возникают в процессе функционирования инфраструктуры, то распространение их нужно рассматривать в рамках некоторых процессов. В качестве модели процесса работы отдельной подсистемы рассматривается функционирование автомата, а взаимодействие

подсистем рассматривается как функционирование и взаимодействие конечных автоматов.

2 Причинно-следственная связь в модели двух автоматов

Конечным автоматом **A** называется [6] вектор $(X, S, Y, \delta, \lambda)$, где конечное множество X служит входным алфавитом автомата, конечное множество S — множеством состояний автомата, конечное множество Y — выходным алфавитом автомата, функция δ отображает множество $X \times S$ в S , а функция λ отображает множество $X \times S$ в Y . Время дискретное, описывается натуральными числами. Процесс функционирования автомата описывается следующими уравнениями (начальное состояние не рассматриваем, пользуемся определением автомата Мура):

$$\begin{aligned}\delta(x(n), s(n)) &= s(n + 1); \\ \lambda(s(n)) &= y(n),\end{aligned}$$

где $x \in X$; $s \in S$; $y \in Y$; $n = 1, 2, \dots$

Рассмотрим механизм восстановления автомата после сбоя (для удобства упоминания о других враждебных действиях подразумеваем, но пропускаем). Введем в множество состояний состояние A , которое соответствует сбою автомата. В множество входных символов добавим символ a , приписанный к очередному входному символу и который инициирует сбой для любого состояния автомата, т. е. при появлении на входе символа a вместе с символом $x(n + 1)$ в момент времени $n + 1$ автомат переходит в состояние A .

Добавим также вспомогательную память, в которой на каждом шаге запоминается штатный входной символ $x(n + 1)$, предыдущий символ $x(n)$ и состояние $s(n)$. При этом выходной символ в момент n будет еще правильным. Будем считать, что восстановление всегда происходит за единицу дискретного времени. Тогда в следующий за восстановлением после сбоя момент времени $n + 2$ автомат, используя память, может считать входным символом $x(n + 1)$ и может вычислить состояние $s(n + 1) = \delta(x(n), s(n))$, которое устанавливается после A .

В состоянии A автомат не выдает выходной символ a , потому что это приведет к мгновенному распространению сбоя, что невозможно в технической системе. Но в момент времени $n + 2$ автомат переходит в рабочее состояние и достает из памяти очередной правильный входной символ $x(n + 1)$, соответствующий рабочему процессу автомата с задержкой на один такт. В момент $n + 2$ автомат находится в состоянии $s(n + 1)$, что соответствует его рабочему процессу, сдвинутому на один такт. Тогда в момент $n + 2$ к выходному символу $\lambda(s(n + 1))$ в некоторых случаях может быть прибавлен символ a . Сформулируем полученный результат в виде леммы.

Лемма. *Построенный алгоритм сохраняет рабочий процесс автомата после сбоя с задержкой на один такт (с добавлением символа a в случаях распространения сбоя).*

Заметим следующее: если отказаться от того, что сбой инициирует специальный входной символ a , то в момент внутреннего сбоя автомата ему достаточно запомнить последние два легальных входных символа и состояние перед сбоем, а алгоритм восстановления также восстановит прерванный рабочий процесс с задержкой на такт.

Теперь рассмотрим схему двух последовательно соединенных автоматов \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 , т. е. выход первого автомата служит входом второго автомата. Будем считать, что после сбоя, когда автомат \mathbf{A}_1 перешел в состояние A и затем восстановился, первый автомат должен детерминированно передать вместе с штатным выходным символом символ a , присоединенный в процессе восстановления автомата \mathbf{A}_1 , который в рассматриваемой схеме вызовет сбой A_2 второго автомата \mathbf{A}_2 . В момент времени n автомат \mathbf{A}_1 находится в состоянии $s(n)$ и получает входной символ $x(n)$. В момент времени $n + 1$ входной символ равен $x(n + 1)a$ и происходит переход состояния $s(n)$ в состояние $\delta(a, s(n + 1)) = A$. При этом такт будет потерян, так как режим автомата будет восстановлен к такту $n + 2$. Тогда в момент $n + 2$ выходная функция автомата \mathbf{A}_1 передаст автомату \mathbf{A}_2 , который находится в режиме ожидания, выходной символ $\lambda(s(n + 1))a$. Этот символ должен перевести автомат \mathbf{A}_2 в состояние сбоя A_2 . Таким образом, автомат \mathbf{A}_2 детерминированно получает сбой как следствие сбоя в автомате \mathbf{A}_1 , который стал причиной сбоя в \mathbf{A}_2 . При этом автомат \mathbf{A}_2 получает достаточную информацию для того, чтобы восстановить штатный процесс, но с задержкой еще на один такт.

Автомат совершает детерминированные действия, и в рассмотренной схеме может сложиться впечатление, что эта детерминированность уже определяет причинно-следственную связь \mathbf{A}_1 с \mathbf{A}_2 . Однако это неверно. В самом деле, следующее состояние автомата \mathbf{A}_2 зависит от его нынешнего состояния. Поэтому причина попадания в конкретное состояние автомата \mathbf{A}_2 не может содержаться в данных автомата \mathbf{A}_1 . Тогда причина детерминированного перехода автомата \mathbf{A}_2 в некоторое фиксированное состояние, содержащаяся в функционировании автомата \mathbf{A}_1 , не должна быть связана с текущим состоянием A_2 .

Возникает вопрос о детерминированности присоединения символа a к выходному символу автомата \mathbf{A}_1 после восстановления. В случае отсутствия этого символа второй автомат будет работать штатно без сбоев, но с задержкой. Действительно, возможно полное восстановление работы системы из двух автоматов после первого восстановления. Однако здесь рассматривается задача распространения сбоя в системе из двух подсистем.

Построенная система восстановления определяет только задержку, но не связана с передачей данных следующей подсистемой. Поэтому для распространения сбоя необходима дополнительная связь сбойного состояния с передаваемой далее информацией. Эту связь реализует дописывание символа a к выходному символу после восстановления, и этот символ входит в причину появления следствия в автомате \mathbf{A}_2 .

Предложенная модель с добавлением символа a на выходе автомата \mathbf{A}_1 позволяет рассматривать схему потери следствия при случайном искажении комплекса

характеристик причины сбоя в автомате \mathbf{A}_2 . Вероятностная модель в этом случае строится очень просто, а именно: причина искажается с вероятностью p , если символ a потерян при передаче, и с вероятностью $1 - p$ сохраняется. Эта модель соответствует искажению причины, при которой не может возникнуть следствие.

Приписывание символа a к выходному символу автомата \mathbf{A}_1 необязательно, если сигналом сбоя для автомата \mathbf{A}_2 стала потеря такта в получении очередного выходного символа автомата \mathbf{A}_1 . Легко понять, что если добавить к входу автомата \mathbf{A}_2 дополнительный вход от внешней системы, то необходима синхронизация этих дополнительных данных с данными, передающимися от автомата \mathbf{A}_1 . Потеря такой синхронизации может считаться сигналом, аналогичным символу a в рассмотренном случае. Поэтому процедура восстановления автомата \mathbf{A}_2 в этом случае становится сложнее, но по-прежнему возможна.

Наконец, можно рассматривать схему взаимодействия двух автоматов без восстановления. В этом случае автомат \mathbf{A}_1 перестает работать, т. е. получать входные символы и передавать выходные символы. Отсутствие входных символов на входе автомата \mathbf{A}_2 также останавливает его работу. Таким образом, останов работы первого автомата становится причиной остановки работы второго автомата. Этот случай также служит примером каскадного сбоя. Как и в предыдущем случае, каскадный сбой порождается зависимостью и причинно-следственными связями.

3 Модель цепочки сбоев с восстановлением

Рассмотрим цепочку автоматов $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_k$, в которых выход предыдущего автомата служит входом следующего с искусственной задержкой на один такт. Иначе цепочка автоматов обладает мгновенной реакцией, что непозволительно для технической системы. Пусть к моменту n включительно система работала исправно. Предположим, что в момент $n + 1$ в автомате \mathbf{A}_1 произошел восстанавливаемый сбой. Тогда с учетом задержки в штатной работе в момент $n + 2$ на автомат \mathbf{A}_2 не поступил входной символ. Отметим, что эта задержка стала еще одним следствием сбоя A в автомате \mathbf{A}_1 . Задержка на один такт на входе автомата \mathbf{A}_2 служит причиной появления такой же нештатной задержки на входе автоматов $\mathbf{A}_3, \dots, \mathbf{A}_k$, даже если все автоматы, кроме \mathbf{A}_1 , работают исправно.

Как отмечалось раньше, в синхронной системе такая задержка вызовет в качестве следствия сбой синхронизации во всех автоматах $\mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_k$. Таким образом, сбой как причина рассинхронизации во всей дальнейшей цепочке служит примером порождения одной причиной множества следствий. Такая цепочка порождения следствий из исходной причины в причинно-следственных связях называется транзитной причиной.

Теперь предположим, что в каждом автомате цепочки $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_k$ при возникновении сбоя в выходном символе после восстановления появляется символ a , который инициирует исправимый сбой в следующем автомате. Это

означает, что после восстановления сбоя во втором автомате A_2 задержка на входе третьего автомата будет уже равна четырем тактам задержки от исходной временной последовательности. Далее на каждом следующем автомате прибавляется дополнительно один такт задержки. В результате автомат A_k должен будет получить необходимый входной сигнал на $2(k - 1)$ тактов позже исходного времени. Это повлечет за собой необходимость решения сложной задачи синхронизации других задач системы. Например, в некотором приборе образуется очередь недопустимой длины, которая вызовет сбой без восстановления всей системы.

4 Заключение

В работе показано, что быстрое восстановление из сбоя для каждой подсистемы большой системы может вызвать глобальный сбой за счет рассинхронизации или за счет появления слишком больших очередей у критических элементов управления. Пример такого глобального сбоя рассмотрен в работе [7]. Анализ таких повреждений основан на отслеживании зависимостей и возникающих причинно-следственных связей, причем надо учитывать транзитивные причинно-следственные связи и возможности возникновения множеств следствий из одной причины. Высокая сложность таких задач очевидна.

Естественным средством защиты от таких сбоев представляется поиск архитектуры системы, которая не допускает возможность возникновения длинных цепочек причинно-следственных связей и множественных следствий у причин.

Литература

1. Чукарин А. В., Самуйлов К. Е., Яркина Н. В. Бизнес-процессы и информационные технологии в управлении современной телекоммуникационной компанией. — М.: Альпина Паблишерс, 2016. 512 с.
2. Merriam Webster's Collegiate Dictionary. — 10th ed. — Springfield, MA, USA: Merriam Webster, 1993. 1557 p.
3. Nan C., Eusgeld I. Exploring impacts of single failure propagation between SCADA and SUC // Conference (International) on Industrial Engineering and Engineering Management. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011. P. 1564–1568. doi: 10.1109/IEEM.2011.6118180.
4. Грушо А. А., Грушо Н. А., Забежайло М. И., Тимонина Е. Е. Локализация исходной причины аномалии // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы, 2020. № 4. С. 9–16.
5. Грушо А. А., Грушо Н. А., Забежайло М. И., Кульченко В. В., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я. Причинно-следственные связи в задачах классификации // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 1. С. 43–49. doi: 10.14357/19922264230106.
6. Кудрявцев В. Б., Алешин С. В., Подколзин А. С. Теория автоматов. — М.: Юрайт, 2023. 320 с.

7. Грушо А. А., Забежайло М. И., Зацаринный А. А., Николаев А. В., Писковский В. О., Тимонина Е. Е. Классификация ошибочных состояний в распределенных вычислительных системах и источники их возникновения // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 29–40. doi: 10.14357/08696527170203.

Поступила в редакцию 07.08.23

AUTOMATA MODELS OF FAULT PROPAGATION AND SELF-HEALING

A. A. Grusho¹, N. A. Grusho¹, M. I. Zabezhailo¹, V. O. Piskovski¹, D. V. Smirnov²,
and E. E. Timonina¹

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

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

Abstract: The papers devoted to information security analysis often discuss the damage caused by attacks on computer systems and information resources but little attention is paid to how hostile attacks and their failures affect business processes and create serious threats to the activities of business systems as a whole. The idea of terrorists — low impact entails great damage — is the main goal of hostile influence on the business system. While studying the problems of the propagation of failures and hostile impacts, dependencies in the business system and cause and effect relationships play the basic role. Finite automaton has been selected to simulate the interaction processes of the business system’s subsystems. A mechanism for recovering the subsystem from a failure has been built. In the causal scheme, a failure propagation model is built in the presence of a mechanism for recovering each automaton after the failure. It is shown that despite the rapid recovery from a failure for each subsystem of a large system, a global failure may occur due to out-of-sync or due to the appearance of too many queues at critical controls.

Keywords: information security; fault propagation; cause-and-effect relationships; automata model of system presentation

DOI: 10.14357/08696527230403

EDN: SIGQCQ

References

1. Chukarin, A. V., K. E. Samuylov, and N. V. Yarkina. 2016. *Biznes-protsessy i informatsionnye tekhnologii v upravlenii sovremennoy telekommunikatsionnoy kompaniy* [Business processes and information technology in the management of a modern telecommunications company]. Moscow: Alpina Publ. 512 p.
2. *Merriam Webster’s Collegiate Dictionary*. 1993. 10th ed. Springfield, MA: Merriam Webster. 1557 p.
3. Nan, C., and I. Eusgeld. 2011. Exploring impacts of single failure propagation between SCADA and SUC. *Conference (International) on Industrial Engi-*

- neering and Engineering Management*. Piscataway, NJ: IEEE. 1564–1568. doi: 10.1109/IEEM.2011.6118180.
4. Grusho, A. A., N. A. Grusho, M. I. Zabezhailo, and E. E. Timonina. 2020. Lokalizatsiya iskhodnoy prichiny anomalii [Root cause anomaly localization]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of Information Security. Computer Systems] 4:9–16.
 5. Grusho, A. A., N. A. Grusho, M. I. Zabezhailo, V. V. Kulchenkov, E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin. 2023. Prichinno-sledstvennyye svyazi v zadachakh klassifikatsii [Causal relationships in classification problems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(1):43–49. doi: 10.14357/19922264230106.
 6. Kudryavtsev, V. B., S. V. Aleshin, and A. S. Podkolzin. 2023. *Teoriya avtomatov* [Automata theory]. Moscow: Yurayt. 320 p.
 7. Grusho, A. A., M. I. Zabezhailo, A. A. Zatsarinnyy, A. V. Nikolaev, V. O. Piskovski, and E. E. Timonina. 2017. Klassifikatsiya oshibochnykh sostoyaniy v raspredelennykh vychislitel'nykh sistemakh i istochniki ikh vozniknoveniya [Erroneous states classification in distributed computing systems and sources of their occurrence]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):29–40. doi: 10.14357/08696527170203.

Received August 7, 2023

Contributors

Grusho Alexander A. (b. 1946) — 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 119333, Russian Federation; grusho@yandex.ru

Grusho Nikolai A. (b. 1982) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; info@itake.ru

Zabezhailo Michael I. (b. 1956) — Doctor of Science in physics and mathematics, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; m.zabezhailo@yandex.ru

Piskovski Viktor O. (b. 1963) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; vpv80@yandex.ru

Smirnov Dmitry V. (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in technology, business partner for IT security department, Sberbank of Russia, 19 Vavilov Str., Moscow 117999, Russian Federation; dvlsmirnov@sberbank.ru

Timonina Elena E. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, professor, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; eltimon@yandex.ru

РАСЧЕТ ЦЕЛЕВЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГОТОВНОСТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИК ИТЭР

*Г. М. Коновалов*¹

Аннотация: Статья посвящена проблеме задания коэффициентов готовности для диагностических систем (диагностик) в комплексе ИТЭР (ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor). Такие системы должны обеспечивать требуемый уровень надежности, с которым измеряются многочисленные параметры комплекса. Возникает ряд сложностей на пути постановки задачи и ее решения. Это, в частности, уникальность объекта, многообразие и многочисленность параметров и диагностик, сложная взаимосвязь между ними, отсутствие аналогов в литературе по надежности. В статье приводятся результаты моделирования с помощью специально разработанной математической модели и вычислительного алгоритма. На примере упрощенной модели диагностического комплекса ИТЭР анализируется чувствительность к значениям эмпирически задаваемых коэффициентов. Полученные результаты могут быть использованы разработчиками различных диагностических подсистем ИТЭР в виде конкретных требований.

Ключевые слова: ИТЭР; математические модели надежности; анализ надежности больших систем; коэффициент готовности

DOI: 10.14357/08696527230404

EDN: PZLYTO

1 Введение

В настоящее время во Франции силами семи участников (ЕС, Япония, США, Россия, Китай, Индия и Южная Корея) под общим руководством международной Организации ИТЭР ведется сооружение термоядерного реактора ИТЭР [1–3]. Требования к проектированию и сооружению ИТЭРа, в частности требования к надежности различных подсистем, даны в проектных документах верхнего уровня (Project Requirements). В части диагностического комплекса — набора диагностических систем, позволяющего осуществлять измерение и контроль параметров плазмы и токамака, — требования к надежности определены в терминах минимальных коэффициентов готовности. Диагностический комплекс включает в себя около восьмидесяти различных диагностик и позволяет измерять более ста параметров. Все параметры разделены на 4 группы в зависимости от их назначения: обеспечение безопасной работы (machine protection — MP), основной и дополнительный контроль работы установки (basic and advanced control — BC и AC) и физические измерения (physics — Ph). Проектной документацией определены только минимальные значения коэффициентов готовности для группы

¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», g.konovалov@iterrf.ru

параметров. Требования к коэффициентам готовности отдельных диагностических подсистем не определены, но для разработчиков диагностик наибольший интерес представляют как раз коэффициенты готовности для отдельных подсистем, так как их уменьшение позволяет упростить конструкцию и, как следствие, существенно сократить затраты на ее разработку и изготовление.

В настоящий момент при определении коэффициентов готовности диагностик разработчики предполагают, что глобальные требования распространяются на подсистему без учета того факта, что параметр может измеряться одновременно несколькими диагностиками и что вклады каждой диагностики в измерение параметра неравнозначны. Такой подход дает завышенные требования к коэффициентам готовности конечных подсистем, так как не учитывает имеющееся дублирование измерений.

Для решения описанной выше проблемы ранее были разработаны математическая модель и вычислительный алгоритм на ее основе [4].

Стоит подчеркнуть, что задача в данной постановке: по заданным требованиям к готовности системы определить требования к входящим в ее состав элементам — является нетрадиционной и, возможно, даже новой для теории надежности. (Во всяком случае она не упоминается в таких фундаментальных источниках, как [5–7].)

Данная статья содержит некоторые результаты, полученные автором в совместной работе Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»¹ и Организации ИТЭР² по определению целевых значений коэффициентов готовности отдельных диагностических подсистем ИТЭР.

Материал статьи распределен следующим образом. Раздел 2 содержит краткое описание математической модели (подробное описание модели и алгоритма, созданного на ее основе, дано в [4]). В разд. 3 содержится описание входных данных, собранных Организацией ИТЭР для моделирования. В разд. 4 и 5 обсуждаются полученные результаты. В заключении статьи подводятся некоторые итоги и определяются перспективы дальнейших исследований по данной тематике.

2 Математическая модель

В [4] были предложены модель, а также алгоритм, разработанный на ее основе, которые позволяют решить задачу определения требований к коэффициентам готовности отдельных диагностик на основе заданных коэффициентов готовности групп измеряемых параметров и известной структурно-функциональной взаи-

¹Организация, уполномоченная Правительством РФ обеспечивать вклад РФ в натуральной форме в проект ИТЭР.

²Международная организация, юридически ответственная за сооружение и эксплуатацию установки ИТЭР.

мосвязи между диагностиками и измеряемыми параметрами. Приведем кратко основные положения модели.

Исходными объектами модели служат два конечных множества:

- (1) набор из M подлежащих измерению *параметров*, $P = \{p\}$, $|P| = M$;
- (2) совокупность из N *диагностик*, $D = \{d\}$, $|D| = N$, осуществляющих эти измерения.

Каждый параметр $p \in P$ характеризуется:

- коэффициентом готовности b_p ;
- минимально допустимым значением коэффициента готовности b_p^* ;
- набором диагностик $D_p \subset D$, способных осуществлять измерение данного параметра.

Таким образом, необходимые требования к надежности измерения параметров отражают неравенства:

$$b_p \geq b_p^*, \quad p \in P. \quad (1)$$

Как было указано выше, каждый параметр имеет определенное назначение (operation role) в системе.

Таким образом, множество параметров P разбивается на 4 непересекающихся подмножества:

$$P = P^{\text{MP}} + P^{\text{BC}} + P^{\text{AC}} + P^{\text{Ph}}.$$

Каждому типу назначения сопоставлено число, характеризующее общие требования по коэффициенту готовности для параметров, принадлежащих одному и тому же подмножеству:

$$b^{\text{MP}} = 0,985; \quad b^{\text{BC}} = 0,98; \quad b^{\text{AC}} = 0,91; \quad b^{\text{Ph}} = 0,9.$$

Каждая диагностика $d \in D$ характеризуется:

- *собственным* коэффициентом готовности a_d ;
- ограничениями на минимально и максимально возможные значения собственного коэффициента готовности:

$$\underline{a}_d \leq a_d \leq \bar{a}_d; \quad (2)$$

- набором параметров $P_d \in P$, доступных для измерения с помощью данной диагностики.

Важно отметить, что собственный коэффициент готовности a_d диагностики d по отношению к измеряемому параметру $p \in P_d$ умножается на *весовой коэффициент*, который обозначается $k_{p,d}$, $k_{p,d} \leq 1$. Выбор коэффициентов $k_{p,d}$ является экспертной задачей и определяется вкладом диагностики d в измерение параметра $p \in P_d$.

Резюмируя этот пункт, перечислим основные входные и выходные данные модели.

Входными данными модели служат:

- множества параметров P и диагностик D ;
- *структура* системы, заданная с помощью наборов $\{D_p, p \in P\}$ и $\{P_d, d \in D\}$;
- вектор требований к коэффициентам готовности измерения параметров b^* ;
- векторы ограничений на допустимые значения коэффициентов готовности диагностик \underline{a} и \bar{a} ;
- набор весовых коэффициентов $K = \{k_{p,d} \leq 1, p \in P, d \in D\}$ (полагаем $k_{p,d} = 0$, если диагностика d не участвует в измерении параметра p).

Выходными данными модели служат векторы коэффициентов готовности:

- параметров, $b = (b_1, \dots, b_M)$,
- диагностик, $a = (a_1, \dots, a_N)$,

причем все элементы векторов a и b должны удовлетворять условиям (1) и (2).

Постановка на основе вышеописанной модели математической задачи, решение которой позволило бы определить коэффициенты готовности диагностик, наталкивается на определенные трудности, которые связаны с отсутствием каких-либо априорных ограничений или критериев кроме неравенств (1) и (2). Поэтому требуется рассмотреть дополнительные факторы, которые хотя бы косвенно отражают естественные инженерно-экономические ограничения. Основные неформальные интуитивные предпосылки при разработке алгоритма для определения коэффициентов готовности диагностик заключаются в следующем. Желательно найти такое решение, которое

- (а) обеспечивает выполнение неравенств (1) и (2);
- (б) выглядит в каком-то смысле наиболее экономичным;
- (в) обеспечивает более или менее «равномерные» значения коэффициентов готовности для разных диагностик.

Необходимость требования (а) очевидна. Условия (б) и (в) нуждаются в пояснении. Дело в том, что, формулируя проблему, разработчики проекта ИТЭР не указали каких-либо дополнительных по сравнению с условиями (1) и (2) требований, которые ограничивали бы либо значения коэффициентов готовности диагностик, либо их техническую сложность, либо стоимость их разработки. Поэтому, кажется, единственный способ попытаться «сэкономить» — это принять предположение, что изготовить диагностику тем легче и тем дешевле, чем меньше ее коэффициент готовности. Кроме того, довольно естественным представляется желание избежать перекосов, т. е. таких решений, при которых некоторые диагностики будут иметь предельно высокие значения коэффициента готовности, а другие, наоборот, допускать частые отказы.

Для практического применения модели и построенного на ее основе расчетного алгоритма была создана программная система с развитым пользовательским интерфейсом [8], которая позволяет создавать модели, состоящие из произвольного числа измеряемых параметров и диагностик. Каждый элемент модели — параметр или диагностика — может быть сконфигурирован произвольным образом. Параметры можно разбивать на группы в зависимости от их назначения и для каждой группы задавать требуемый коэффициент готовности. Вклад каждой диагностики в измерение параметров задается пользователем произвольно. Для моделирования ситуации, когда диагностика считается уже разработанной, программа предоставляет возможность зафиксировать коэффициент готовности на произвольном уровне. Структурно-функциональная связь между измеряемыми параметрами и диагностиками также определяется пользователем.

3 Входные данные

Для получения целевых значений коэффициентов готовности отдельных подсистем диагностического комплекса ИТЭР Организация ИТЭР подготовила и предоставила следующие входные данные:

- функциональная связь диагностик и измеряемых параметров;
- весовые коэффициенты для каждой пары «параметр–диагностика». Например, если коэффициент равен 1, то это означает, что диагностика может полностью удовлетворить требование по измерению параметра. Если коэффициент равен 0 — параметр вообще не может быть измерен данной диагностикой. Согласно проектной документации, существуют три типа вклада диагностики в измерение параметра: основной, резервный и дополнительный. В модели предлагаются следующие значения по умолчанию для весовых коэффициентов: 1 — для основного измерения, 0,3 — для резервного и 0,1 — для дополнительного. По определению, «дополнительный» означает, что диагностика подтверждает измерение или предоставляет данные для его калибровки, но сама по себе недостаточна для измерения. Для моделирования этого определения явно мало. Аналогичная ситуация и с резервным вкладом — формальное определение недостаточно для того, чтобы строго задать весовые коэффициенты в модели. Поэтому весовые коэффициенты выбирались на основе экспертной оценки;
- число независимых каналов диагностики для измерения параметра¹. Если каналов более одного, то диагностика может быть рассмотрена как набор из параллельно функционирующих идентичных независимых диагностик, и в этом случае на выходе модели будет получено целевое значение коэффициента готовности одного канала диагностики.

¹Канал диагностики считается независимым, если он спроектирован целиком, от сенсора до устройства хранения/обработки данных, таким образом, что поломка любого элемента канала не влияет на работу других каналов данной диагностики.

Модель не учитывает сервисные службы и любые внешние интерфейсы диагностик, поскольку отказы этих служб, согласно требованиям Организации ИТЭР, должны учитываться в анализе надежности их собственных систем [9].

4 Результаты моделирования

Самые первые прогоны модели показали, что решение задачи определения целевых значений показателей готовности отдельных диагностических подсистем существует, но для некоторых диагностик целевые значения оказались крайне высокими ($> 99\%$), что во многих случаях нереализуемо технически. Причина этого заключается в том, что некоторые параметры измеряются только одной диагностикой с первичным вкладом. Это, как следствие, приводит к тому, что требование к коэффициенту готовности измерения этого параметра очень высокое, иначе невозможно удовлетворить общее требование на всю группу параметров.

Это может быть проиллюстрировано на следующем реальном примере. Рассмотрим два измеряемых параметра ИТЭРа: *флюенс нейтронов* (*neutron fluence*) и *интенсивность рассеянного излучения электронно-циклотронного (ЭЦ) нагрева* (*in vessel electron cyclotron heating stray radiation intensity*). Рассчитанные программой минимальные значения коэффициентов готовности этих параметров — $99,93\%$ и $99,2\%$ соответственно. Первый параметр измеряется двумя диагностиками с первичным вкладом: *монитором нейтронного потока* и *системой активации*. За счет имеющегося дублирования рассчитанные программой целевые значения для этих двух диагностик — $98,5\%$ и $98,8\%$. Второй параметр измеряется только одной диагностикой — *внутрикамерными детекторами ЭЦ-нагрева*, что автоматически повышает целевое значение для этой диагностики до величины $99,2\%$.

С другой стороны, расчеты показали, что коэффициенты готовности групп параметров превышают проектные требования.

Подчеркнем, что решение задачи нахождения набора целевых значений коэффициента готовности не единственное. Например, изменение весовых коэффициентов или фиксирование значений коэффициентов готовности для отдельных диагностик позволяют получать разные наборы решений. Выбор окончательного решения определяется экспертным путем с учетом возможности практической реализации для каждой диагностики, входящей в состав диагностического комплекса ИТЭР.

Согласно алгоритму [3], коэффициент готовности отдельных параметров определяется в зависимости от суммарного вклада диагностик в его измерение (чем больше диагностик измеряет параметр, тем выше минимальное значение его коэффициента готовности). Чтобы устранить проблему неприемлемо высоких целевых значений коэффициентов готовности отдельных диагностик, исходный программный код [8] был модифицирован: была добавлена возможность ручной установки минимальных значений коэффициентов готовности для отдельных

Таблица 1 Коэффициенты готовности (А) групп параметров

Назначение	Требование, %	А, %
МР	98,5	98,50
ВС	98	97,99
АС	91	94,55
Рн	90	90,00

параметров. Таким образом, минимальные значения критических параметров (параметров, которые приводили к возникновению неприемлемо высоких целевых значений) были снижены. При этом контролировалось выполнение требований на соблюдение минимальных значений коэффициентов готовности групп параметров.

После такой корректировки модели было получено решение, которое (а) определяет целевые значения коэффициентов готовности отдельных диагностик в диапазоне [96%; 98,9%]¹ и (б) удовлетворяет требованиям к группам параметров (табл. 1). Эти целевые значения были переданы в Организацию ИТЭР с целью дальнейшего распространения их среди разработчиков различных подсистем в виде конкретных требований.

5 Анализ чувствительности

Как указывалось ранее, каждая пара «параметр–диагностика» характеризуется так называемым весовым коэффициентом, который отражает вклад диагностики в измерение параметра. Весовой коэффициент зависит от роли диагностики со следующими значениями по умолчанию: 1 — для первичного измерения; 0,3 — для запасного; 0,1 — для вспомогательного. Как было сказано выше, в процессе сбора входных данных для модели значения коэффициентов были уточнены для каждой конкретной пары «параметр–диагностика», т. е. выбор значения весового коэффициента производился на основе экспертной оценки. Логичным образом встает вопрос, насколько чувствительна модель к значениям весовых коэффициентов.

Для ответа на этот вопрос был проведен ряд расчетов, в которых значения коэффициентов варьировались в некотором диапазоне вокруг базовых значений. Под базовыми понимаются те значения, которые были указаны экспертами при сборе исходных данных.

Для сокращения машинного времени, требуемого на вычисления, расчеты проводились на упрощенной модели, в которой были оставлены только пара-

¹На основе имеющегося опыта оценки надежности диагностических систем ИТЭР можно заключить, что данный диапазон относительно легко реализуем на практике.

Таблица 2 Целевые значения коэффициентов готовности диагностики «Анализатор атомов перезарядки» для разных весовых коэффициентов

Отклонение весового коэффициента от базового значения	Коэффициент готовности диагностики
Базовое значение	98,75
-0,025	98,5
+0,025	98,25
+0,05	97,75
+0,075	96,75

метры с ролями МР и ВС (55 параметров и 67 диагностик, измеряющих эти параметры).

Вычисления были разбиты на две серии.

1. В первой серии экспериментов варьировались одновременно коэффициенты для всех пар «параметр–диагностика» (за исключением первичных измерений) в диапазоне $[-0,025; +0,075]$ относительно базовых значений с шагом 0,025. Вычислялись требования к отдельным диагностикам и общее значение коэффициентов готовности для группы параметров. Результаты вычислений показали следующее:

- значения коэффициентов готовности для 49 диагностик (I группа) или никак не изменились, или изменились пренебрежимо мало (за пределами точности вычислений) по сравнению с исходной моделью;
- коэффициенты готовности для оставшихся диагностик (II группа) заметно изменяются в зависимости от величины коэффициента;
- общие значения коэффициентов для группы параметров изменяются пропорционально увеличению весовых коэффициентов.

В качестве иллюстрации приведем результат расчета целевых значений коэффициента готовности для диагностики «Анализатор атомов перезарядки» (Neutral particle analyzer) (табл. 2).

2. Во второй серии экспериментов в рамках одного вычисления варьировались весовые коэффициенты для какой-то одной диагностики (для всех параметров, обеспечиваемых данной диагностикой за раз) из групп I и II. Как и в предыдущей серии, весовые коэффициенты для первичных измерений оставались неизменными (равными 1). Диапазон варьирования для группы I был $[-0,05; +0,5]$, для группы II — $[-0,2; +0,3]$. Выбор диапазона обусловлен базовыми значениями весовых коэффициентов. Чтобы сохранить значения коэффициентов готовности отдельных диагностик на техно-

логически приемлемом уровне, на коэффициенты готовности диагностики накладывались такие же ограничения, как в разд. 4.

Результаты вычислений показали следующее:

- для группы I в подавляющем большинстве случаев каких-либо изменений не наблюдается, т. е. целевые значения коэффициентов готовности практически не зависят от весовых коэффициентов;
- для группы II наблюдается существенное влияние значения весовых коэффициентов как на требования к готовности отдельных диагностик, так и к общей готовности всей группы параметров.

Таблица 3 Результаты варьирования весовых коэффициентов для отдельной диагностики (на примере диагностик из групп I и II)

Группа I					
Коэффициенты	Отклонение весового коэффициента от базового значения				
	Базовое значение	–0,05	+0,1	+0,3	+0,5
Коэффициент готовности диагностики (<i>Thermocouple target</i>)	96	96	96	96	96
Коэффициент готовности параметра, измеряемого диагностикой	99,96	99,96	99,97	99,97	99,98
Коэффициент готовности группы параметров с ролью МР	98,5	98,5	98,5	98,51	98,52
Коэффициент готовности группы параметров с ролью ВС	97,96	97,96	97,96	97,96	97,96
Группа II					
Коэффициенты	Отклонение весового коэффициента от базового значения				
	Базовое значение	–0,2	–0,1	+0,1	+0,3
Коэффициент готовности диагностики (<i>Rogowskis divertor</i>)	98,48	—	98,5	98,48	98,48
Коэффициент готовности параметра, измеряемого диагностикой	99,6	—	99,54	99,65	99,75
Коэффициент готовности группы параметров с ролью МР	98,5	—	98,45	98,55	98,64
Коэффициент готовности группы параметров с ролью ВС	97,96	—	97,96	97,96	97,96

Примечания. В скобках в первой колонке указаны официальные названия диагностических систем. Прочерки в таблице означают, что решение в данной конфигурации невозможно, так как не реализуется требование к коэффициенту готовности для одного или нескольких параметров. Однако решение возможно получить и в этом случае, но тогда придется устанавливать требования к коэффициентам готовности диагностик выше заданных ограничений.

Для иллюстрации в табл. 3 приведены результаты расчетов для случайно выбранных диагностик из I и II групп. Таблица 3 содержит также вычисленные коэффициенты готовности параметров, которые измеряют данные диагностики с вкладом, отличным от первичного, и коэффициенты готовности для групп параметров в зависимости от роли.

6 Заключение

В результате моделирования на основе разработанного ранее алгоритма и программы был получен набор целевых значений коэффициентов готовности отдельных диагностик ИТЭРа. Полученные значения могут быть использованы разработчиками подсистем в качестве требований при разработке и создании диагностик.

Анализ чувствительности показал, что значения весовых коэффициентов оказывают влияние в тех случаях, когда «обеспеченность» параметра измерениями низкая, т. е. когда параметр измеряется (как правило) только одной диагностикой с первичным вкладом. Расчеты показали, что изменение весовых коэффициентов в небольших пределах позволяет в определенных случаях снизить на 1%–2% целевое значение коэффициента готовности. Для некоторых диагностик, согласно данным разработчиков систем, такое снижение может оказать решающее значение при проектировании системы. Например, для упомянутого выше «Анализатора атомов перезарядки» оцененный на стадии предварительного проектирования коэффициент готовности составил примерно 98% (при целевом значении 98,75%). Оценка, выполненная разработчиками этой системы, показала, что увеличение коэффициента готовности до требуемого целевого значения потребует существенного изменения дизайна как самой системы, так и смежных с ней систем, что приведет к неприемлемым временным и финансовым затратам.

Варьирование весовых коэффициентов позволяет также выявить узкие места диагностического комплекса ИТЭРа, например определить, какие параметры обеспечиваются измерениями без какой бы то ни было избыточности (в терминах коэффициента готовности измерения).

Поскольку решение задачи нахождения коэффициентов готовности индивидуальных диагностик не единственное, то путем варьирования весовых коэффициентов для одних диагностик можно увеличить запас по готовности для всей группы параметров и за счет этого снизить требования для других по алгоритму, описанному в разд. 4.

В случае необходимости получения более точных оценок коэффициентов готовности диагностик необходимо определять весовые коэффициенты более точно, с учетом множества факторов (технических, технологических, экономических и т. д.), что выходит за рамки данной работы. Однако это, как было показано выше, имеет смысл делать только для слабо обеспеченных измерениями параметров.

Литература

1. International Thermonuclear Experimental Reactor. <http://www.iter.org/proj/iterhistory>.
2. *Holtkamp J.* An overview of the ITER project // *Fusion Eng. Des.*, 2007. Vol. 82. P. 427–434. doi: 10.1016/j.fusengdes.2007.03.029.
3. *Коновалов Г. М.* Методика расчета надежности международного термоядерного экспериментального реактора и оптимизация действий по снижению рисков // *Системы и средства информатики*, 2016. Т. 26. № 1. С. 166–181. doi: 10.14357/08696527160111. EDN: VZBFOX.
4. *Коновалов Г. М.* Проблема задания коэффициентов готовности диагностических систем в проекте ИТЭР: постановка задачи и алгоритм решения // *Системы и средства информатики*, 2020. Т. 30. № 2. С. 89–102. doi: 10.14357/08696527200209. EDN: LACZYA.
5. *Байхельт Ф., Франкен П.* Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Пер. с нем. — М.: Радио и связь, 1988. 392 с. (*Beichelt F., Franken P.* Zuverlässigkeit und Instandhaltung. Mathematische Methoden. — Berlin: VEB Verlag Technik, 1983. 315 p.).
6. *Беляев Ю. К., Богатырев В. А., Болотин В. В. и др.* Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
7. *Острейковский В. А.* Теория надежности. — М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
8. Программа расчета целевых значений коэффициентов готовности диагностик ИТЭР «ITER Diagnostic Availabilities». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612266.
9. *Van Houtte D., Okayama K., Sagot F.* RAMI approach for ITER // *Fusion Eng. Des.*, 2010. Vol. 85. P. 1220–1224. doi: 10.1016/j.fusengdes.2010.03.007.

Поступила в редакцию 15.09.23

CALCULATION OF AVAILABILITY TARGETS FOR ITER DIAGNOSTICS

G. M. Konovalov

Institution “Project Center ITER” of the Russian Federation National Nuclear Corporation “ROSATOM,” 1-3 Kurchatova Sq., Moscow 123182, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the problem of setting availabilities for diagnostic systems (diagnostics) in the ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) project. Such systems should provide the required level of availability with which numerous parameters of the ITER are measured. A number of difficulties arise on the way of problem formulation and its solution. These include, in particular, the uniqueness of the object, the variety and multiplicity of parameters and diagnostics, the complex interrelation between them, and the absence of analogues in the reliability literature. The paper presents the results

of modeling using the developed earlier mathematical model and the computational algorithm. Also, by the example of a simplified model of the ITER diagnostic complex, the sensitivity to the values of empirically set coefficients is analyzed. The obtained results can be used by the developers of various diagnostic subsystems of ITER in the form of defined requirements.

Keywords: ITER; mathematical models of reliability; large system reliability analysis; availability

DOI: 10.14357/08696527230404

EDN: PZLYTO

References

1. International thermonuclear experimental reactor. Available at: <http://www.iter.org/proj/iterhistory/> (accessed October 26, 2023).
2. Holtkamp, J. 2007. An overview of the ITER project. *Fusion Eng. Des.* 82:427–434. doi: 10.1016/j.fusengdes.2007.03.029.
3. Konovalov, G. M. 2016. Metodika rascheta nadezhnosti mezhdunarodnogo termoyadernogo eksperimental'nogo reaktora i optimizatsiya deystviy po snizheniyu riskov [Methodology of reliability calculation of International Thermonuclear Experimental Reactor and optimization of risk mitigation actions]. *Systemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(1):166–181. doi: 10.14357/08696527160111. EDN: VZBFOX.
4. Konovalov, G. M. 2020. Problema zadaniya koeffitsientov gotovnosti diagnosticheskikh sistem v proekte ITER: postanovka zadachi i algoritm resheniya [The problem of setting availability targets for ITER diagnostics: Problem statement and solution algorithm]. *Systemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 30(2):89–102. doi: 10.14357/08696527200209. EDN: LACZYA.
5. Beichelt, F., and P. Franken. 1983. *Zuverlässigkeit und Instandhaltung. Mathematische Methoden*. Berlin: VEB Verlag Technik. 315 p.
6. Belyayev Yu. K., Bogatyrev V. A., Bolotin V. V., et al. 1985. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: Spravochnik* [Reliability of technical systems: Handbook]. Ed. I. A. Ushakov. Moscow: Radio i svyaz'. 608 p.
7. Ostreykovskiy, V. A. 2003. *Teoriya nadezhnosti* [Theory of reliability]. Moscow: Vysshaya shkola. 463 p.
8. Programma rascheta tselevykh znacheniy koeffitsientov gotovnosti diagnostik ITER "ITER Diagnostic Availabilities" [Program for calculating target values of availability factors for ITER diagnostics "ITER Diagnostic Availabilities"]. Certificate of state registration of a computer program No. 2020612266.
9. Van Houtte, D., K. Okayama, and F. Sagot. 2010. RAMI approach for ITER. *Fusion Eng. Des.* 85:1220–1224. doi: 10.1016/j.fusengdes.2010.03.007.

Received September 15, 2023

Contributor

Konovalov Grigory M. (b. 1980) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, deputy project manager for quality, Institution "Project Center ITER" of the Russian Federation National Nuclear Corporation "ROSATOM," 1-3 Kurchatova Sq., Moscow 123182, Russian Federation; g.konovalov@iterrf.ru

АЛГОРИТМ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НЕКОТОРЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАДАНИЙ В ЧАСТИЧНО НАБЛЮДАЕМЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ*

М. Г. Коновалов¹, Р. В. Разумчик²

Аннотация: Рассматривается модель стохастической системы с параллельным (неоднородным) обслуживанием, единственным потоком независимых заданий, централизованной диспетчеризацией и частичным наблюдением, под которым понимается отсутствие в модели обратной связи. Диспетчеру для принятия решения доступна только априорная информация о характеристиках системы (включая ее исходное состояние) и информация о совершенных им действиях, включая моменты, в которые эти действия совершались. Предложен (параметрический) алгоритм глобальной оптимизации стационарного среднего времени пребывания или стационарного среднего времени ожидания заданием начала обслуживания, применимый в общих предположениях о распределениях времен между поступлениями заданий, их размерах и дисциплинах обслуживания. В основе алгоритма лежит предположение о том, что оптимального значения целевой функции можно достичь с произвольной точностью с помощью диспетчеризации конечной глубины.

Ключевые слова: системы с параллельным обслуживанием; диспетчеризация; управление при неполном наблюдении; программное управление

DOI: 10.14357/08696527230405

EDN: PQAIRH

1 Введение

Рассматриваемая в статье задача относится к известному направлению теоретических и прикладных исследований, цель которых — повышение качества использования потенциальных возможностей, заложенных или закладываемых в стохастические системы распределенных вычислений. Приемы повышения качества их работы довольно разнообразны (распараллеливание, увеличение уровня иерархий, смена дисциплин обслуживания и т. п.). Однако из-за технических особенностей наиболее действенные приемы могут оказаться неприменимы,

*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, mkonov@ipiran.ru

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

и показатели производительности остаются на уровнях, значительно отличающихся от максимально возможных. Такой особенностью является частичная наблюдаемость, под которой в этой статье понимается полное отсутствие какой-либо информации в реальном времени о ее состоянии или, другими словами, невозможность наблюдения ее состояния после запуска¹.

Примером реально функционирующих систем распределенных вычислений с частичной наблюдаемостью служат системы добровольных вычислений²; однако, вообще говоря, любая система распределенных вычислений, в которой планировщик ограничен в своих решениях простейшей рандомизированной или программной стратегией³, может рассматриваться как частично наблюдаемая система в указанном смысле. Центральное место в процессе оперативного управления системами распределенных вычислений занимает проблема оптимальной диспетчеризации, т. е. оптимального управления выбором ресурсов для поступающих заданий. Даже если ограничиться простейшей из содержательных моделей⁴, что и сделано в данной статье (см. разд. 2), то существующий в литературе арсенал подходов не дает ответа на вопрос, чему равен оптимум⁵ при рассматриваемых жестких ограничениях в наблюдаемости.

В данной статье предложен алгоритм⁶ (см. разд. 3), позволяющий находить ответ на этот вопрос, когда целевой функцией служит стационарное среднее время пребывания задания в системе или стационарное среднее время ожидания начала обслуживания. В его основе лежит предположение⁷ о том, что как угодно близко к оптимуму можно приблизиться путем применения, начиная с некоторого момента, одного и того же правила конечной глубины (см. (1)). Алгоритм предназначен для использования на компьютерной имитационной модели, возможной благодаря наличию точной априорной информации о характеристиках системы, и представляет собой последовательность изменяющихся во времени правил управления. Результатом его работы является диспетчеризация⁸ конечной глубины, которая может быть реализована в программном обеспечении планировщика реальной системы и не требует каких-либо аппаратных изменений. Хотя в процессе поиска оптимума алгоритм не требует исследования всех

¹ При этом исходное состояние и вообще вся априорная информация о характеристиках системы считаются известными в точности.

² См. таксономию, например, в [1].

³ Подробное описание стратегий приведено, например, в [2].

⁴ Имея в виду системы добровольных вычислений, которые по-прежнему остаются предметом научных исследований [3–5].

⁵ Здесь имеются в виду классические целевые функционалы и предполагается, что система гетерогенна (например, производительности процессоров различны). Более подробно см. [6] и разд. 1 в [2].

⁶ Относящийся к алгоритмам первого порядка.

⁷ Для определенного класса управляемых регенерируемых объектов аналогичное утверждение доказано (см. [7].)

⁸ Своя для каждого набора конкретных значений параметров модели.

вариантов предыстории, его трудоемкость остается высокой из-за необходимости работы с несчетными множествами.

2 Описание модели

Рассматривается совокупность из K параллельно и независимо друг от друга работающих процессоров постоянной производительности v_1, \dots, v_K , каждый с очередью неограниченной емкости для хранения заданий. Дисциплина обслуживания очереди значения не имеет, но считается известной и принадлежащей классу консервативных дисциплин. Функция распределения F входящего потока, равно как и функция распределения G размера заданий считаются известными. Предполагается, что задания поступают по одному к единственному диспетчеру, который мгновенно выбирает номер процессора, не имея информации ни о размерах заданий, ни о загруженности процессоров и очередей в них. Однако диспетчер может запоминать все свои предыдущие решения, а также моменты поступления заданий.

Будем обозначать через $t(n)$ момент поступления n -го по счету задания. В эти моменты диспетчеру нужно принять решение о номере процессора. Положим $\theta(n) = t(n+1) - t(n)$. Пусть $x_i(n)$ — длина очереди на процессоре i в момент $t(n)$, $\xi(n)$ — длина задания, поступившего в момент $t(n)$, а $y(n) \in \{1, \dots, K\}$ — управление в момент $t(n)$. Исходя из возможностей наблюдения и имеющейся априорной информации, $y(n)$ при каждом n можно считать случайной функцией, зависящей от предыстории управлений и промежутков между поступлениями заданий, причем эта функция может быть построена с помощью распределений F и G . Пусть $w(n)$ — среднее время пребывания (или ожидания начала обслуживания) задания, поступившего в момент $t(n)$. Целью управления ставится минимизация стационарного среднего¹

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w(n).$$

3 Структура правил конечной глубины

Из данного в предыдущем разделе описания следует, что рассматриваемый процесс диспетчеризации представим в виде управляемой марковской цепи с (одношаговыми) доходами $g(n)$. Зафиксируем натуральное число h и введем обозначения:

$$y^h = (y_1, \dots, y_n); \quad \theta^h = (\theta_1, \dots, \theta_h), \quad y_i \in \{1, \dots, K\}, \quad 0 < \theta_i < \infty.$$

¹Для моделей рассматриваемого типа вопрос о существовании конечного предела решается, как правило, достаточно легко и связан с тем условием, чтобы загрузка системы была меньше единицы.

Будем говорить, что цепь имеет в момент $t(n)$ предысторию (y^h, θ^h) , если

$$y(n-h) = y_h; \theta(n-h) = \theta_h; \dots; y(n-1) = y_1; \theta(n-1) = \theta_1.$$

Определим управление $y(n)$ с помощью условного распределения $\sigma(y; y^h, \theta^h)$:

$$\sigma(n, k; y^h, \theta^h) = \Pr \{y(n) = k | y(n-h) = y_h, \dots, y(n-1) = y_1; \\ \theta(n-h) = \theta_h, \dots, \theta(n-1) = \theta_1\},$$

где в условии стоит вся наблюдаемая предыстория до момента $t(n-h)$ включительно. Таким образом, функция $\sigma(y; y^h, \theta^h)$ служит правилом диспетчеризации в момент $t(n)$, которое задает вероятность направить задание на сервер с номером $k \in \{1, \dots, K\}$ при наличии предыстории (y^h, θ^h) . Последовательность¹ вероятностных распределений $\{(\sigma(n, 1; y^h, \theta^h), \dots, \sigma(n, K; y^h, \theta^h)), n = h+1, h+2, \dots\}$ является однородной диспетчеризацией конечной глубины.

Обозначим через $\Omega = \{\omega : \omega = (y^h, \theta^h)\}$ множество всех наборов (y^h, θ^h) . Пусть задано конечное разбиение множества Ω на $d \geq 1$ непересекающихся подмножеств $\{\Omega_1, \dots, \Omega_d\}$. Рассмотрим кусочно-постоянные диспетчеризации глубины h вида

$$\sigma(k; \omega) = \sum_{i=1}^d p_i(k) I_i(\omega), \quad k \in \{1, \dots, K\}, \omega \in \Omega, \quad (1)$$

где $(p_i(1), \dots, p_i(K))$ — некоторое вероятностное распределение; $I_i(\omega)$ — индикаторная функция множества Ω_i . Применение правила (1) в момент, когда предыстория равнялась $\omega \in \Omega_i$, означает, что задание направляется на сервер с номером k с вероятностью $p_i(k)$.

4 Алгоритм поиска диспетчеризации заданной конечной глубины

В основе алгоритма поиска кусочно-постоянной диспетчеризации $\sigma(k; \omega)$ лежит параллельное решение двух задач: поиска подходящих семейств распределений $(p_i(1), \dots, p_i(K))$ и правильной дискретизации множества Ω .

Следуя [7], первая задача может быть решена однотипно для всех i при зафиксированном разбиении $\{\Omega_1, \dots, \Omega_d\}$. Пусть i фиксировано, $k \in \{1, \dots, K\}$ и пусть $t(n_m)$, $m = 1, 2, \dots$, — моменты принятия решения, в которые произошло событие

{предыстория содержится в множестве Ω_i и выбирается сервер с номером k }.

¹В которой первые h значений (т. е. правил, управлений) произвольны.

Определим величину $v(k, m)$ как сумму L одношаговых доходов, полученных в моменты $t(n_m), t(n_m + 1), \dots, t(n_m + L - 1)$, и положим

$$V(k, m) = M^{-1}(v(k, D - M + 1) + \dots + v(k, m)),$$

где L и M — некоторые натуральные числа. Величины $V(k, m)$ играют роль оценок для компоненты $p_i(k)$ распределения $(p_i(1), \dots, p_i(K))$. Пересчет распределения осуществляется в моменты $t(n_m)$ по формуле:

$$p_i(k) = \prod_{\delta} (p_i(k) - \alpha V(k, m)), \quad k \in \{1, \dots, K\},$$

где $\alpha > 0$ и $\delta > 0$; \prod_{δ} — оператор проектирования на множество $\{(p_i(1), \dots, p_i(K)) : \sum_{k=1}^K p_i(k) = 1, p_i(k) \geq \delta\}$.

Для описания решения второй задачи — построения разбиения множества Ω — введем следующее отношение порядка (\prec). Зафиксируем $\varepsilon > 0$. В случае предыстории глубиной $h = 1$ для двух элементов $\omega_1 = (y_1, \theta_1) \in \Omega$ и $\omega_2 = (y_2, \theta_2) \in \Omega$ будем считать, что $\omega_1 \prec \omega_2$, если либо $y_1 < y_2$, либо $y_1 = y_2$ и $\theta_1 < \theta_2 - \varepsilon$. Если же выполнены условия $y_1 = y_2$ и $|\theta_1 - \theta_2| < \varepsilon$, то будем писать $\chi_1 \approx \chi_2$. При предыстории глубиной $h = 2$ для двух элементов $\omega_1 = (\omega_1^1, \omega_1^2) \in \Omega \times \Omega$ и $\omega_2 = (\omega_2^1, \omega_2^2) \in \Omega \times \Omega$ будем считать, что $\omega_1 \prec \omega_2$, если либо $\omega_1^1 \prec \omega_2^1$, либо $\omega_1^1 \approx \omega_2^1$ и $\omega_1^2 \prec \omega_2^2$. Если же $\omega_1^1 \approx \omega_2^1$ и $\omega_1^2 \approx \omega_2^2$, то будем писать $\omega_1 \approx \omega_2$. На случай произвольной глубины предыстории отношение \prec распространяется по индукции.

Динамическую структуру разбиения будем отображать¹ с помощью направленного дерева с переменным множеством вершин и дуг. Рассмотрим древовидный двоичный направленный связный граф \mathcal{G} , все узлы которого могут иметь исходящие дуги, которые ведут к нижележащим узлам, «левому» и «правому». Одна или обе такие дуги (и соответствующие узлы) могут отсутствовать. Каждому узлу соответствует «метка» — элемент из множества Ω . Между метками узлов установлена следующая закономерность. Пусть ψ , ψ_l и ψ_r — метки соответственно некоторого узла, его левого узла и его правого узла². Тогда выполняются «неравенства» $\psi_l \prec \psi \prec \psi_r$. Граф \mathcal{G} позволяет однозначно сопоставить произвольному элементу $\omega \in \Omega$ некоторый его узел $\varphi_{\mathcal{G}}(\omega)$. Пусть в графе есть по крайней мере один (корневой) узел. Функция $\varphi_{\mathcal{G}}(\chi)$ определяется следующим алгоритмом.

Шаг 1. Выбирается корневой узел графа.

Шаг 2. Определяется метка ψ выбранного узла.

¹Отметим, что похожий прием использовался в [8].

²Если таковые имеются.

Шаг 3. Если $\omega \approx \psi$, то выбранный узел объявляется значением функции $\varphi_{\mathcal{G}}(\omega)$ и алгоритм заканчивается. Если $\omega \prec \psi$ и если левая дуга существует, то выбирается левый узел и повторяется шаг 2. Если левая дуга отсутствует, то она добавляется в граф вместе с новым узлом, для которого назначается метка ω . Новый узел объявляется значением функции и алгоритм заканчивается. Если $\psi \prec \omega$ и если правая дуга существует, то выбирается правый узел и повторяется шаг 2. Если правая дуга отсутствует, то она добавляется в граф вместе с новым узлом, для которого назначается метка ω . Новый узел объявляется значением функции $\varphi_{\mathcal{G}}(\omega)$ и алгоритм заканчивается.

Нетрудно видеть, что разбиение множества Ω , задаваемое парой $(\mathcal{G}, \varphi_{\mathcal{G}})$, представляется в виде набора подмножеств $\{\Omega_g, g \in \mathcal{G}\}$. Таким образом, в моменты $t(h+1), t(h+2), \dots$ имеется граф \mathcal{G} , с каждым узлом g которого ассоциирован вектор $(p_g(1), \dots, p_g(K))$. Если ω — предыстория в момент $t(n)$, $n > h$, и $g = \varphi_{\mathcal{G}}(\omega)$, то управление в момент¹ $t(n)$ выбирается с помощью вектора $(p_g(1), \dots, p_g(K))$.

5 Некоторые численные результаты

Остановимся лишь на одном примере, дающем первое представление о качестве новой диспетчеризации. Рассмотрим полностью марковскую модель из $K = 2$ процессоров и очередями, обслуживаемыми по дисциплине FIFO (first in, first out). В таблице приведены значения стационарного среднего времени пребывания задания в модели при диспетчеризации по новому алгоритму, а также при лучших из известных диспетчеризаций для частично наблюдаемых систем с параллельным обслуживанием²: рандомизированной (далее — RND),

Стационарное среднее время пребывания задания в модели с двумя процессорами при различных диспетчеризациях. Производительности процессоров $v_1 = 2/3$, $v_2 = 1/3$, входящий поток — пуассоновский, распределение размера заданий — экспоненциальное со средним 1

Алгоритм	Загрузка системы				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
RND	1,76	2,58	3,77	6,39	19,4
PROG	1,76	2,40	3,22	5,17	15,0
АА	1,74	2,28	3,14	5,11	14,9
Алгоритм из разд. 4	1,74	2,28	3,14	5,12	14,9

¹Напомним, что первые h управлений произвольны.

²Подробное описание стратегий см., например, в [1; 4, разд. 5].

программной¹ (далее — PROG), диспетчеризации по предыстории² (далее — AA).

Указанные в таблице диспетчеризации — параметрические: для RND, PROG и AA использовались³ оптимальные значения параметров. Что касается предложенного алгоритма, то значения его параметров выбирались из общих соображений достаточно произвольно; например, глубина памяти h варьировалась от нескольких единиц (при низкой загрузке) до нескольких десятков (при высокой загрузке). Как видно из таблицы, такого подхода к выбору значений неизвестных параметров достаточно, чтобы новый алгоритм оптимизировал целевую функцию не хуже⁴ лучшего из ранее известных алгоритмов — алгоритма AA, основанного на совершенно иной идее.

6 Заключение

Несмотря на то что накопленный объем знаний по аналитическим моделям диспетчеризации (маршрутизации, распределения ресурсов) огромен, остаются относительно простые, но важные случаи, в которых вопросы оптимизации не получили должного разрешения. Данная статья посвящена задаче поиска глобального оптимума стационарного среднего времени пребывания или ожидания начала обслуживания в модели частично наблюдаемых систем с параллельным обслуживанием, в которых диспетчеризация осуществляется централизованно. Предложенный алгоритм (при сделанном в разд. 1 предложении) реализует принципиально общий подход к решению рассматриваемого класса задач. Однако на пути его реализации есть серьезный барьер — организация вычислительной процедуры. Его преодоление и численное нахождение до сих пор неизвестных оптимумов представляется заключительным шагом в цикле исследований проблемы диспетчеризации без обратной связи.

Важно отметить, что полученный результат справедлив в самых общих предположениях о входящем потоке, числе процессоров и дисциплинах обслуживания очередей. Ввиду этого он (в числе прочих алгоритмов диспетчеризации по предыстории), будучи программно реализован в существующих планировщиках центров коллективного пользования, гарантированно позволит повысить эффективность функционирования системы, не требуя изменений ее структуры и состава.

¹ Алгоритм SG в [9, с. 184] (см. также описание в [10]).

² Алгоритм [11].

³ Полученные либо путем решения оптимизационной задачи, либо путем оптимизации на имитируемых траекториях.

⁴ Наблюдаемое расхождение при загрузке 0,7 объясняется тем, что параметры предложенного алгоритма не подвергались целенаправленной оптимизации.

Литература

1. *Mengistu T. M., Che D.* Survey and taxonomy of volunteer computing // ACM Comput. Surv., 2019. Vol. 52. No. 3. Art. 59. 35 p. doi: 10.1145/3320073.
2. *Коновалов М. Г., Разумчик Р. В.* Диспетчеризация в частично наблюдаемых стохастических системах конечной емкости с параллельным обслуживанием // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 3. С. 29–47. doi: 10.14357/08696527230303. EDN: XUVVNH.
3. *Albertian A., Kurochkin I., Vatutin E.* Improving the heterogeneous computing node performance of the desktop grid when searching for orthogonal diagonal latin squares // High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production / Eds. V. Jordan, I. Tarasov, V. Faerman. — Communications in computer and information science ser. — Cham: Springer, 2022. Vol. 1526. P. 161–173. doi: 10.1007/978-3-030-94141-3_13.
4. *Lakshmi L.* Resource and history-aware IoT task scheduling in volunteer assisted Fog computing // Conference (International) on Smart Applications, Communications and Networking Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022. Art. 9993995. 6 p. doi: 10.1109/SmartNets55823.2022.9993995.
5. *Gonzalo S., Marquès J., García-Villoria A., Panadero J., Calvet L.* CLARA: A novel clustering-based resource-allocation mechanism for exploiting low-availability complementarities of voluntarily contributed nodes // Future Gener. Comp. Sy., 2022. Vol. 128. P. 248–264. doi: 10.1016/j.future.2021.10.002.
6. *Hordijk W., Hordijk A., Heidergott B.* A genetic algorithm for finding good balanced sequences in a customer assignment problem with no state information // Asia Pac. J. Oper. Res., 2015. Vol. 32. No. 3. Art. 1550015. 20 p. doi: 10.1142/S0217595915500153.
7. *Коновалов М. Г.* Методы адаптивной обработки информации и их приложения. — М.: ИПИ РАН, 2007. 212 с.
8. *Коновалов М. Г., Разумчик Р. В.* Диспетчеризация в системе с параллельным обслуживанием с помощью распределенного градиентного управления марковской цепью // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 3. С. 41–50. doi: 10.14357/19922264210306.
9. *Hordijk A., van der Laan D.* Periodic routing to parallel queues and billiard sequences // Math. Method. Oper. Res., 2004. Vol. 59. No. 2. P. 173–192. doi: 10.1007/s001860300322.
10. *Konovvalov M., Razumchik R.* Minimizing mean response time in batch-arrival non-observable systems with single-server FIFO queues operating in parallel // Communications ECMS, 2021. Vol. 35. No. 1. P. 272–278. doi: 10.7148/2021-0272.
11. *Konovvalov M., Razumchik R.* Improving routing decisions in parallel non-observable queues // Computing, 2018. Vol. 100. No. 10. P. 1059–1079. doi: 10.1007/s00607-018-0598-5.

Поступила в редакцию 15.09.23

ALGORITHM FOR GLOBAL OPTIMIZATION OF TIME-RELATED STATIONARY CHARACTERISTICS OF JOBS IN NONOBSERVABLE PARALLEL QUEUES

M. G. Konovalov and R. V. Razumchik

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

Abstract: Consideration is given to the model of a stochastic system comprised of a finite number of parallel independently running queues with heterogeneous servers, a single flow of independent jobs, and a single dispatcher which possesses full *a priori* information about the system’s parameters and its initial state. At any moment, the dispatcher does not have any feedback from the queues but can memorize its previous routing decisions and time instants at which the decisions were made. Under quite general assumptions about the jobs’ interarrival and jobs’ size distributions and queues’ scheduling, the (policy gradient) algorithm is proposed which allows one to locate the global optimum of the job’s stationary mean sojourn or waiting time. The algorithm is based on the assumption that one can reach the neighborhood of the global optimum by applying the dispatching policy with a finite memory.

Keywords: parallel service systems; dispatching; control under incomplete observations; program control

DOI: 10.14357/08696527230405

EDN: PQAIRH

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. Mengistu, T. M., and D. Che. 2019. Survey and taxonomy of volunteer computing. *ACM Comput. Surv.* 52(3):59. 35 p. doi: 10.1145/3320073.
2. Konovalov, M., and R. Razumchik. 2023. Dispetcherizatsiya v chastichno nablyudaemykh stokhasticheskikh sistemakh konechnoy emkosti s parallel’nym ob-sluzhivaniem [Dispatching in nonobservable parallel queues with finite capacities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(3):29–47. doi: 10.14357/08696527230303. EDN: XUVVNH.
3. Albertian, A., I. Kurochkin, and E. Vatutin. 2022. Improving the heterogeneous computing node performance of the desktop grid when searching for orthogonal diagonal latin squares. *High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production*. Eds. V. Jordan, I. Tarasov, and

- V. Faerman. Communications in computer and information science ser. Cham: Springer. 1526:161–173. doi: 10.1007/978-3-030-94141-3_13.
4. Lakshmi, L. 2022. Resource and history-aware IoT task scheduling in volunteer assisted Fog computing. *Conference (International) on Smart Applications, Communications and Networking Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. Art. 9993995. 6 p. doi: 10.1109/SmartNets55823.2022.9993995.
 5. Gonzalo, S., J. Marquès, A. Garc{ia}-Villoria, J. Panadero, and L. Calvet. 2022. CLARA: A novel clustering-based resource-allocation mechanism for exploiting low-availability complementarities of voluntarily contributed nodes. *Future Gener. Comp. Sy.* 128:248–264. doi: 10.1016/j.future.2021.10.002.
 6. Hordijk, W., A. Hordijk, and B. Heidergott. 2015. A genetic algorithm for finding good balanced sequences in a customer assignment problem with no state information. *Asia Pac. J. Oper. Res.* 32(3):1550015. 20 p. doi: 10.1142/S0217595915500153.
 7. Konovalov, M. G. 2007. *Metody adaptivnoy obrabotki informatsii i ikh prilozheniya* [Methods of adaptive information processing and their applications]. Moscow: IPI RAN. 212 p.
 8. Konovalov, M., and R. Razumchik. 2021. Dispetcherizatsiya v sisteme s parallel'nym obsluzhivaniem s pomoshch'yu raspredelennogo gradientnogo upravleniya markovskoy tsep'yu [Routing jobs to heterogeneous parallel queues using distributed policy gradient algorithm]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 15(3):41–50. doi: 10.14357/19922264210306.
 9. Hordijk, A., and D. A. van der Laan. 2004. Periodic routing to parallel queues and billiard sequences. *Math. Method. Oper. Res.* 59(2):173–192. doi: 10.1007/s001860300322.
 10. Konovalov, M., and R. Razumchik. 2021. Minimizing mean response time in batch-arrival non-observable systems with single-server FIFO queues operating in parallel. *Communications ECMS* 35(1):272–278. doi: 10.7148/2021-0272.
 11. Konovalov, M., and R. Razumchik. 2018. Improving routing decisions in parallel non-observable queues. *Computing* 100(10):1059–1079. doi: 10.1007/s00607-018-0598-5.

Received September 15, 2023

Contributors

Konovalov Mikhail G. (b. 1950) — Doctor of Science in technology, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; mkonovalov@ipiran.ru

Razumchik Rostislav V. (b. 1984) — Doctor of Science in physics and mathematics, Deputy Director, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; rrazumchik@ipiran.ru

МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫБОРА УРОВНЕЙ СКОРОСТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТРАФИКА eMBB В УСЛОВИЯХ ПРИОРИТЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ТРАФИКА URLLC В СЕТИ 5G*

Е. Д. Макеева¹, И. А. Кочеткова², В. С. Шоргин³

Аннотация: Для современных беспроводных сетей пятого поколения (fifth generation, 5G) характерно совместное использование сверхнадежной передачи данных с малой задержкой (ultrareliable low-latency communication, URLLC) и усовершенствованной подвижной широкополосной связи (enhanced mobile broadband, eMBB). URLLC зачастую имеют малый объем и могут занимать часть ресурсного блока. В статье проанализирована схема совместного обслуживания трафика URLLC и трафика eMBB в виде системы массового обслуживания с приоритетным доступом с возможностью снижать скорость и прерывать передачу eMBB при поступлении URLLC. Численно проведен анализ задачи выбора уровней скорости передачи трафика eMBB для максимизации скорости eMBB с учетом ограничений на вероятности блокировки и прерывания обслуживания eMBB.

Ключевые слова: 5G; eMBB; URLLC; система массового обслуживания; приоритетный доступ; прерывание обслуживания; снижение скорости передачи

DOI: 10.14357/08696527230406

EDN: OLMNXC

1 Введение

Сети пятого поколения характеризуются высокой пропускной способностью, высокой скоростью передачи данных, обеспечивают низкие задержки и высокую надежность [1]. К типовым сценариям использования сети 5G относится массовая машинная связь (massive machine-type communications, mMTC), сверхнадежная передача данных с малой задержкой и усовершенствованная подвижная широкополосная связь [2]: mMTC предполагает множество передающих небольшой объем данных без высоких требований к задержке устройств; URLLC — это передача критически важных данных со строгими требованиями к задержке, безопасности и надежности; eMBB характеризуется высокой скоростью передачи данных с высокой плотностью пользователей.

* Публикация выполнена в рамках проекта № 025319-2-000 системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

¹ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы; Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова Российской академии наук, elena-makeeva-96@mail.ru

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

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

Возникает задача организации совместного предоставления услуг из разных сценариев с отличающимися требованиями к качеству обслуживания, например URLLC и eMBB [3]. Один из подходов к распределению ресурса между трафиком URLLC и eMBB — это нарезка радиоресурсов (network slicing) с гарантией изоляции и обеспечением заданных уровней производительности [4, 5]. Другой подход связан с использованием схем мультиплексирования — ортогональный множественный доступ (orthogonal multiple access, OMA), предполагающий передачу в разных частотных диапазонах, и неортогональный множественный доступ NOMA (nonorthogonal multiple access) — в одних и тех же частотно-временных диапазонах [6–8].

В данной статье, продолжающей исследования [9], используется схема NOMA. Статья имеет следующую структуру: в разд. 2 описано функционирование системы и построена математическая модель в виде системы массового обслуживания, в разд. 3 формулируется задача выбора уровней скорости трафика eMBB для максимизации средней скорости его передачи, в разд. 4 приводится численное решение данной задачи и, наконец, в заключительном разделе приведены основные результаты работы.

2 Построение модели

Рассмотрим соту пропускной способности V с устройствами, отправляющими запросы на передачу трафика URLLC и eMBB. Пусть потоки таких запросов будут пуассоновскими с интенсивностями λ_1/λ_2 , а время сессий распределено по экспоненциальному закону с параметрами μ_1/μ_2 соответственно. Скорость передачи трафика URLLC постоянна и равна 1, а скорость сессии eMBB может принимать одно из K значений вектора уровней скорости $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_K)$, $b_1 > \dots > b_K$. Для начала передачи данных требуется 1 и b_1 пропускной способности соответственно. Максимальное число сессий eMBB при этом будет равно $M = V/b_1$. Трафик URLLC — приоритетный: если при поступлении нового запроса URLLC весь ресурс занят, то будет снижена скорость одной из сессий eMBB, а если скорость уже минимальна, то будет прервана одна из eMBB-сессий. Скорость при этом будет восстановлена после завершения передачи трафика URLLC. Схема с принципом совместного обслуживания трафика eMBB и URLLC показана на рис. 1.

В качестве модели системы выступает система массового обслуживания с приоритетным доступом. Систему опишем случайным процессом с состояниями $(n, \mathbf{m}) = (n, m_1, \dots, m_K)$, где n — число сессий URLLC, $\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_K)$ — число сессий eMBB на соответствующей скорости. Пусть $b(n, \mathbf{m}) = n + \sum_{k=1}^K b_k m_k$ — занятый ресурс в состоянии (n, \mathbf{m}) , тогда пространство состояний случайного процесса имеет вид:

$$\mathcal{X} = \left\{ (n, \mathbf{m}) : 0 \leq n \leq N, m_k \geq 0, k = \overline{1, K}, \sum_{k=1}^K m_k \leq M, b(n, \mathbf{m}) \leq V \right\}.$$

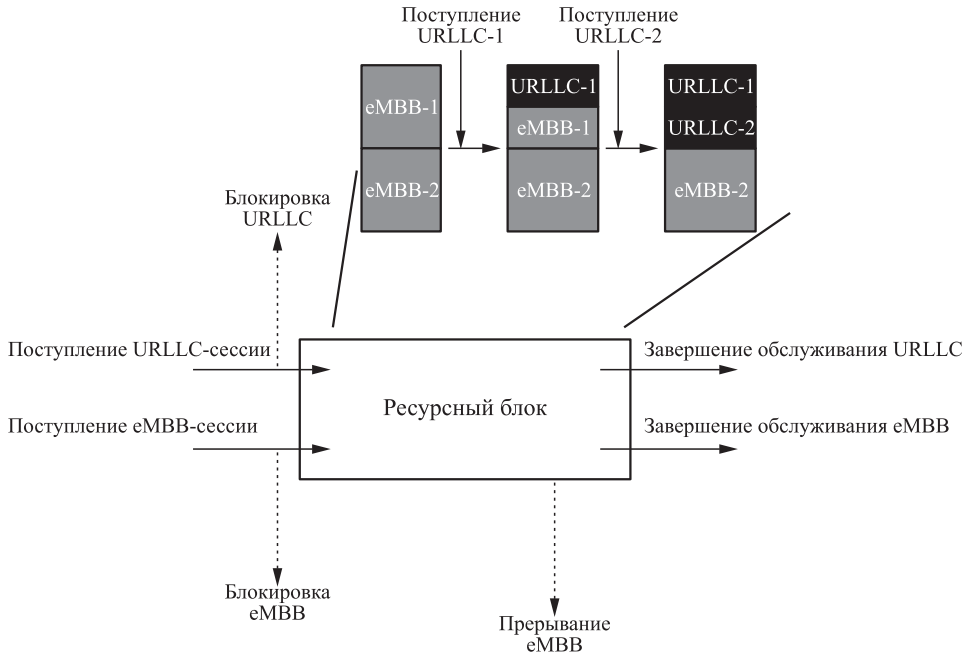


Рис. 1 Принцип совместного обслуживания трафика eMBB и URLLC

Учитывая описанные правила управления доступом и обозначив \mathbf{e}_k единичный вектор с 1 на k -м месте, интенсивности переходов между состояниями системы можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 a(n, \mathbf{m})(n + 1, \mathbf{m}) &= \lambda_1, & b(n, \mathbf{m}) + 1 &\leq V; \\
 a(n, \mathbf{m})(n + 1, \mathbf{m} - \mathbf{e}_k + \mathbf{e}_{k+1}) &= \lambda_1, & b(n, \mathbf{m}) + 1 &> V, m_k > 0, \\
 & & \sum_{i=1}^{k-1} m_i &= 0, k = \overline{1, K-1}; \\
 a(n, \mathbf{m})(n + 1, \mathbf{m} - \mathbf{e}_K) &= \lambda_1, & b(n, \mathbf{m}) + 1 &> V, m_K > 0, \sum_{k=1}^{K-1} m_k = 0; \\
 a(n, \mathbf{m})(n, \mathbf{m} + \mathbf{e}_K) &= \lambda_2, & b(n, \mathbf{m}) + b_1 &\leq V; \\
 a(n, \mathbf{m})(n - 1, \mathbf{m} - \mathbf{e}_k + \mathbf{e}_{k-1}) &= n\mu_1, n > 0, & \sum_{i=k+1}^K m_i &= 0, m_k > 0, k = \overline{2, K}; \\
 a(n, \mathbf{m})(n - 1, \mathbf{m}) &= n\mu_1, n > 0, & \sum_{k=2}^K m_k &= 0; \\
 a(n, \mathbf{m})(n, \mathbf{m} - \mathbf{e}_k) &= m_k\mu_2, m_k > 0, & k &= \overline{1, K}.
 \end{aligned}$$

3 Задача выбора уровней скорости

Решив соответствующую систему уравнений равновесия и получив стационарные вероятности $\pi(n, \mathbf{m})$, $(n, \mathbf{m}) \in \mathcal{X}$, состояний системы, определим следующие показатели эффективности обслуживания трафика eMBB:

- вероятность блокировки сессии eMBB:

$$B = \sum_{(n, \mathbf{m}) \in \mathcal{B}} \pi(n, \mathbf{m}), \quad \mathcal{B} = \{(n, \mathbf{m}) \in \mathcal{X} : b(n, \mathbf{m}) + b_1 > V\};$$

- вероятность прерывания сессии eMBB:

$$P = \sum_{m_K=1}^M \frac{1}{m_K} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + n\mu_1 + m_K\mu_2} \pi(V - b_K m_K, 0, \dots, 0, m_K);$$

- средняя скорость передачи сессии eMBB:

$$\bar{b} = \left[\sum_{(n, \mathbf{m}) \in \mathcal{X}: \mathbf{m} \neq \mathbf{0}} \sum_{k=1}^K b_k m_k \left(\sum_{k=1}^K m_k \right)^{-1} \pi(n, \mathbf{m}) \right] \left[1 - \sum_{n=0}^V \pi(n, \mathbf{0}) \right]^{-1}.$$

Задачу выбора уровней скорости для трафика eMBB определим как задачу максимизации средней скорости сессии eMBB при ограничениях на вероятность блокировки \widehat{B} и прерывания \widehat{P} в условиях минимальной скорости \widehat{b} сессии eMBB при заданном начальном наборе скоростей $\mathcal{D} = \{d_1, \dots, d_K\}$ и их числа K . Численное решение данной задачи максимизации позволит получить рекомендательный набор значений скорости передачи широкополосного трафика eMBB:

$$(K^*, \mathbf{b}^*) = \arg \max_{K, \mathbf{b}} (K, \mathbf{b}),$$

$$b_k \in \mathcal{D} = \{d_1, \dots, d_K\}, \quad k = \overline{1, K},$$

$$b_1 > \dots > b_K \geq \widehat{b},$$

$$B(K, \mathbf{b}) \leq \widehat{B},$$

$$P(K, \mathbf{b}) \leq \widehat{P}.$$

4 Пример численного анализа

Перейдем к численному анализу и рассмотрим два сценария: (а) исследуем зависимость вероятностей блокировки и прерывания сессии eMBB от интенсивности запросов URLLC; (б) проиллюстрируем численное решение задачи выбора

уровней скорости для сессий eMBB. Пусть пропускная способность канала составляет 42 Мбит/с, рекомендуемая скорость сессии eMBB — 5 Мбит/с. Запросы URLLC поступают в n раз чаще трафика eMBB, $\lambda_1 = n\lambda_2$, а среднее время сессий равно $\mu_1^{-1} = 1$ мс и $\mu_2^{-1} = 120$ с.

В первом сценарии положим уровни скорости сессии eMBB $\mathbf{b} = (6, 5, 4)$ и 3 варианта $\lambda_2 = 0,4, 0,6$ и $0,8$. На рис. 2 показаны полученные графики: из рис. 2, а видно, что при увеличении интенсивности поступления запросов URLLC средняя скорость сессии eMBB снижается, однако вероятности блокировки и прерывания меняют свое поведение в зависимости (см. рис. 2, б и 2, в). При $n < 3000$ вероятность блокировки снижается, а вероятность прерывания увеличивается, т.е. запросы eMBB принимаются к обслуживанию, но чаще претерпевают прерывания. При $n > 3000$ вероятность блокировки увеличивается, а вероятность прерывания снижается. Так, при $\lambda_2 = 0,4$ достигается максимальная скорость сессии eMBB, а вероятности блокировки и прерывания минимальны. Если, например, вероятность блокировки должна быть меньше 0,2, а вероятность прерывания меньше $0,6 \cdot 10^{-5}$, то только интервал $6000 < n < 9000$ будет удовлетворять ограничениям.

Перейдем ко второму сценарию. Пусть $\lambda_2 = 0,4$ и $K = 3$. Тогда возможные варианты наборов уровней скорости $(K; \mathbf{b})$: (3; 6, 5, 4); (2; 6, 5); (2; 6, 4); (2; 5, 4); (1; 6); (1; 5); (1; 4). Результаты расчетов показаны на рис. 3. Как видно из рис. 3, а, максимальная средняя скорость сессии eMBB достигается при наборе скоростей (1; 6), однако при этом вероятность прерывания максимальна (см. рис. 3, в). Рассмотрим примеры подбора уровней скорости исходя из заданных ограничений \hat{B} и \hat{P} .

1. Если $\hat{B} \leq 0,1$ и $\hat{P} \leq 3 \cdot 10^{-6}$, то:

- при $10\,000 < n < 20\,000$ подходят наборы (2; 5, 4), (2; 6; 5), (2; 6; 4) и (1; 4), а максимальная скорость достигается при наборах (2; 6, 5) и (2; 6, 4);
- при $20\,000 < n < 90\,000$ ни один набор не подходит;
- при $90\,000 < n < 100\,000$ подходят наборы (1; 6) и (1; 5), при (1; 6) достигается максимальная скорость eMBB.

2. Если $\hat{B} \leq 0,2$ и $\hat{P} \leq 2 \cdot 10^{-6}$, то:

- при $10\,000 < n < 20\,000$ подходит набор (2; 5, 4);
- при $n > 100\,000$ подходят наборы (1; 6), (1; 5) и (1; 4), при (1; 6) достигается максимальная скорость eMBB.

3. Если $\hat{B} \leq 0,2$ и $\hat{P} \leq 4 \cdot 10^{-6}$, то:

- при $80\,000 < n < 100\,000$ подходят все наборы, кроме (3; 6, 5, 4), а максимальная скорость достигается при (2; 6, 5) и (1; 6);

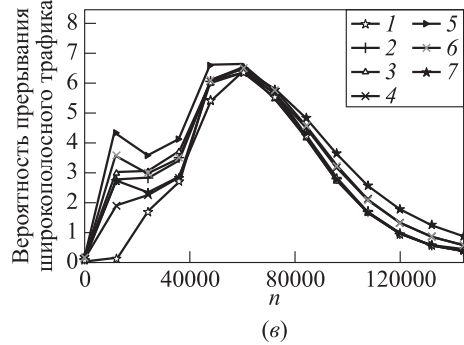
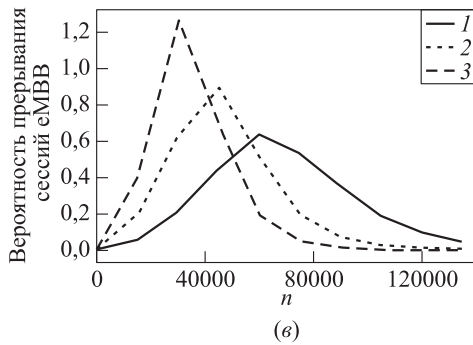
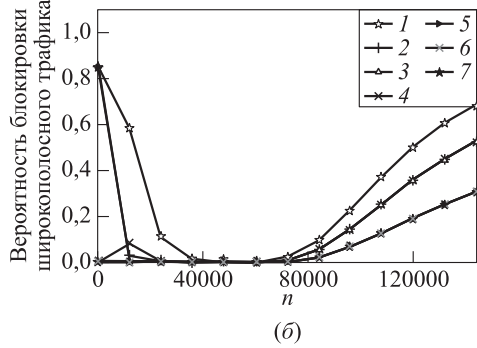
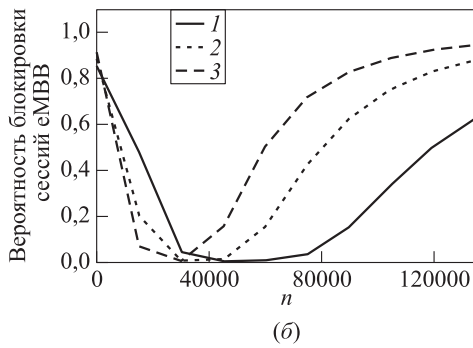
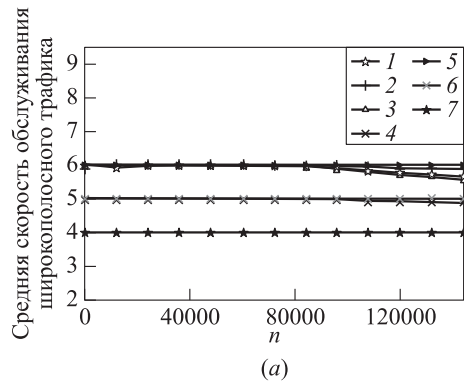
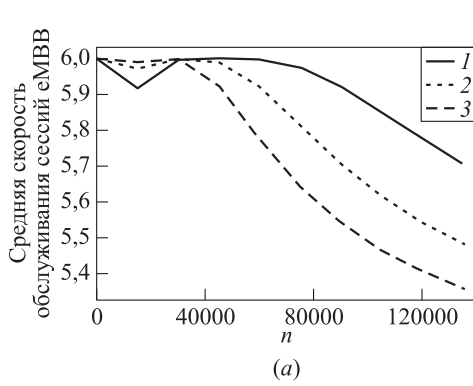


Рис. 2 Среднее число сессий eMBB (а), вероятность блокировки сессии eMBB (б) и вероятность прерывания сессии eMBB (в) для $\mathbf{b} = (6, 5, 4)$: 1 — $\lambda_{eMBB} = 0,4$; 2 — 0,6; 3 — $\lambda_{eMBB} = 0,8$

Рис. 3 Среднее число сессий eMBB (а), вероятность блокировки сессии eMBB (б) и вероятность прерывания сессии eMBB (в) для выбора уровней скорости: 1 — $\lambda_{eMBB} = (3; 6, 5, 4)$; 2 — (2; 6, 5); 3 — (2; 6, 4); 4 — (2; 5, 4); 5 — (1; 6, 5); 6 — (1; 5); 7 — $\lambda_{eMBB} = (1; 4)$

- при $100\,000 < n < 120\,000$ подходят наборы (1; 6), (1; 5) и (1; 4) и при (1; 6) достигается максимальная скорость eMBB.

5 Заключение

В работе проведено исследование модели совместного обслуживания трафика eMBB и URLLC в виде системы массового обслуживания с приоритетным доступом URLLC в рамках решения задачи максимизации средней скорости передачи eMBB. Проведен численный анализ для исследования зависимостей показателей трафика eMBB, проиллюстрировано определение диапазона значений доли трафика URLLC относительно eMBB, при котором достигается максимальная из возможных скоростей передачи трафика eMBB для рассмотренного примера. Проиллюстрировано численное решение задачи максимизации с получением рекомендуемых наборов значений скорости eMBB-трафика в зависимости от наложенных ограничений на вероятности блокировки и прерывания.

Литература

1. *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. No. 2. P. 1072–1116. doi: 10.1109/COMST.2022.3156207.
2. *IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond: Recommendation ITU-R M.2083-0*, 2015.
3. *Bairagi A. K., Munir M. S., Alsenwi M., Tran N. H., Alshamrani S. S., Masud M., Han Z., Hong C. S.* Coexistence mechanism between eMBB and URLLC in 5G wireless networks // *IEEE T. Commun.*, 2020. Vol. 69. No. 3. P. 1736–1749. doi: 10.1109/TCOMM.2020.3040307.
4. *Popovski P., Trillingsgaard K. F., Simeone O., Durisi G.* 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view // *IEEE Access*, 2018. Vol. 6. P. 55765–55779. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872781.
5. *Shen X., Zeng Z., Liu X.* RIS-assisted network slicing resource optimization algorithm for coexistence of eMBB and URLLC // *Electronics*, 2022. Vol. 1. No. 16. doi: 10.3390/electronics11162575.
6. *Gerasin I. S., Krasilov A. N., Khorov E. M.* Dynamic multiplexing of URLLC traffic and eMBB traffic in an uplink using nonorthogonal multiple access // *J. Commun. Technol. El.*, 2020. Vol. 65. No. 6. P. 750–755. doi: 10.1134/S1064226920060108.
7. *Ivanova D., Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Koucheryavy Y., Samouylov K.* Performance of priority-based traffic coexistence strategies in 5G mmWave industrial deployments // *IEEE Access*, 2022. Vol. 10. P. 9241–9256. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3143583.
8. *Ivanova D., Adou Y., Markova E., Gaidamaka Y., Samouylov K.* Mathematical framework for mixed reservation- and priority-based traffic coexistence in 5G NR systems // *Mathematics*, 2023. Vol. 11. No. 4. doi: 10.3390/math11041046.

9. 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.

Поступила в редакцию 15.09.23

QUEUING MODEL FOR CHOOSING eMBB BIT RATE LEVELS UNDER URLLC PRIORITY TRANSMISSION IN A 5G NETWORK

E. D. Makeeva^{1,2}, *I. A. Kochetkova*^{1,3}, and *V. S. Shorgin*³

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

²V. A. Trapeznikov Institute of Control Science of the Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya St., Moscow 117997, Russian Federation

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

Abstract: Fifth generation (5G) wireless networks are characterized by joint transmission of ultrareliable low-latency communications (URLLC) and enhanced mobile broadband (eMBB). URLLC is often small in size and can take up part of a resource block. The paper analyzes a scheme for joint URLLC and eMBB transmission in the form of a queuing system with priority admission control with the ability to reduce bit rate and interrupt eMBB transmission when URLLC arrives. Numerical analysis of the problem of selecting eMBB traffic transmission rate levels to maximize the eMBB bit rate taking into account restrictions on the eMBB blocking and service interruption probabilities was performed.

Keywords: 5G; eMBB; URLLC; queuing system; priority admission control; interruption; bit rate degradation

DOI: 10.14357/08696527230406

EDN: OLMNXC

Acknowledgments

This publication has been supported by the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University) Scientific Projects Grant System, project No. 025319-2-000.

References

1. 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.
2. ITU-R. 2015. IMT Vision — Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. Recommendation ITU-R M.2083-0.

3. Bairagi, A. K., M. S. Munir, M. Alsenwi, N. H. Tran, S. S. Alshamrani, M. Masud, Z. Han, and C. S. Hong. 2021. Coexistence mechanism between eMBB and URLLC in 5G wireless networks. *IEEE T. Commun.* 69(3):1736–1749. doi: 10.1109/TCOMM.2020.3040307.
4. Popovski, P., K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, and G. Durisi. 2018. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view. *IEEE Access* 6:55765–55779. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872781.
5. Shen, X., Z. Zeng, and X. Liu. 2022. RIS-assisted network slicing resource optimization algorithm for coexistence of eMBB and URLLC. *Electronics* 11(16). doi: 10.3390/electronics11162575.
6. Gerasin, I. S., A. N. Krasilov, and E. M. Khorov. 2020. Dynamic multiplexing of URLLC traffic and eMBB traffic in an uplink using nonorthogonal multiple access. *J. Commun. Technol. El.* 65(6):750–755. doi: 10.1134/S1064226920060108.
7. Ivanova, D., E. Markova, D. Moltchanov, R. Pirmagomedov, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov. 2022. Performance of priority-based traffic coexistence strategies in 5G mmWave industrial deployments. *IEEE Access* 10:9241–9256. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3143583.
8. Ivanova, D., Y. Adou, E. Markova, Y. Gaidamaka, and K. Samouylov. 2023. Mathematical framework for mixed reservation- and priority-based traffic coexistence in 5G NR systems. *Mathematics* 11(4). doi: 10.3390/math11041046.
9. Kochetkova, I. A., A. I. Kushchazli, P. A. Kharin, and S. Ya. Shorgin. 2021. Model' dlya analiza prioritelnogo dostupa trafika URLLC pri preryvanii obsluzhivaniya i snizhenii skorosti peredachi sessii eMBB v seti 5G [Model for analyzing priority URLLC transmission with eMBB bit rate degradation and interruptions in 5G networks] *Sistemy i Sredstva Inform.* — *Systems and Means of Informatics* 31(3):123–134. doi: 10.14357/08696527210311.

Received September 15, 2023

Contributors

Makeeva Elena D. (b. 1996) — PhD student, Department of Probability Theory and Cyber Security, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; junior scientist, V. A. Trapeznikov Institute of Control Science of the Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya St., Moscow 117997, Russian Federation; elena-makeeva-96.ru

Kochetkova Irina A. (b. 1985) — 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; kochetkova-ia@rudn.ru

Shorgin Vsevolod S. (b. 1978) — 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; vshorgin@ipiran.ru

АНАЛИЗ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРАТЕГИЙ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ДЛЯ УСТРОЙСТВ 5G С ОГРАНИЧЕННЫМ ФУНКЦИОНАЛОМ*

*В. А. Бесчастный¹, Е. С. Голос², Д. Ю. Острикова³, Е. А. Мачнев⁴,
В. С. Шоргин⁵, Ю. В. Гайдамака⁶*

Аннотация: Недавно стандартизированный тип пользовательского устройства (ПУ) с ограниченным функционалом (Reduced Capability, RedCap) для систем 5G «новое радио» (New Radio, NR) поддерживает новые механизмы ограничения энергопотребления. Используя комбинацию методов сбережения энергии (Discontinuous Reception, DRX), сигнала пробуждения (Wake-Up Signal, WUS) и RRM-релаксации (Radio Resource Management relaxation), ПУ с поддержкой RedCap может обеспечить высокую энергоэффективность, при этом удовлетворяя требованиям к скорости для большого набора приложений. В статье исследуется влияние перечисленных механизмов на энергопотребление ПУ в сетях 5G NR. В качестве основных характеристик рассматриваются энергоэффективность и время полной разрядки батареи. Численные результаты показывают, что совмещение всех рассматриваемых механизмов энергосбережения позволяет увеличить время разрядки батареи на 15%–20%. Механизм WUS более эффективен по сравнению с RRM-релаксацией. При этом указанные выводы сохраняются для широкого диапазона плотностей блокаторов и интенсивностей поступления пакетов.

Ключевые слова: 5G; новое радио; DRX; RedCap; WUS; RRM-релаксация

DOI: 10.14357/08696527230407

EDN: KATMLB

1 Введение

Ожидается, что системы 5G «новое радио» обеспечат большую скорость в сети доступа для приложений будущего. Несмотря на требования, предъявляемые ИТУ-R в М.2410 [1], технология 5G NR показала достаточно высокую энергоёмкость [2, 3] из-за использования широкой полосы пропускания, нескольких

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10084 (<https://rscf.ru/project/23-79-10084>).

¹Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, beschastnyy-va@rudn.ru

²Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 1142220130@rudn.ru

³Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, ostrikova-dyu@rudn.ru

⁴Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 1042200071@rudn.ru

⁵Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, vshorgin@ipirgan.ru

⁶Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, gaydamaka-yuv@rudn.ru

уровней MIMO (Multiple Input Multiple Output) и механизма множественного подключения. Для устранения этого недостатка консорциумом 3GPP (3rd Generation Partnership Project) в релизе 16 было стандартизировано ПУ с ограниченной пропускной способностью и расширены его функциональные возможности в релизе 17 [4]. При этом предполагается, что ПУ RedCap будут использоваться для различных приложений, таких как AR/X-VR, автономные камеры видеонаблюдения с детектором движения и т. п.

Для экономии энергии RedCap предлагает несколько механизмов. В частности, 3GPP в релизе 15 значительно улучшили механизмы DRX, используемые в системах 4G LTE (4th Generation Long-Term Evolution), что позволило применять их для радиointерфейса 5G NR с узкой диаграммой направленности антенны [5]. Кроме того, в релизах 16 и 17 были предложены дополнительные механизмы, включая сигнал пробуждения и RRM-релаксацию [6]. Однако до сих пор исследовательское сообщество не уделяло большого внимания их совместному применению.

В статье исследуется влияние совместного использования методов энергосбережения 5G NR RedCap для широкого спектра приложений, которые используют ПУ RedCap. С этой целью используются инструменты процессов восстановления, поглощающих цепей Маркова и стохастической геометрии, с помощью которых сформулирована общая математическая модель исследуемой системы. В качестве основных метрик используются энергоэффективность и время полной разрядки аккумуляторной батареи. Проводится численный анализ исследуемых характеристик для различных комбинаций методов энергосбережения.

2 Системная модель

Один из наиболее важных вариантов использования приложений AR/VR/XR (augmented reality/virtual reality/extended reality) — промышленная автоматизация. В связи с этим в работе рассматривается типовое производственное помещение квадратной формы с длиной стороны L и базовой станцией (БС), расположенной в точке $(0, 0)$, как показано на рис. 1. Система обслуживает несколько пользователей AR/VR/XR, которые используют ПУ с поддержкой RedCap, например VR-очки, для получения услуги связи. Чтобы обеспечить энергоэффективную работу, ПУ может использовать несколько режимов энергосбережения. Далее в работе рассматривается пользователь, находящийся в точке $(x(t), y(t))$ на плоскости пола здания в момент времени t . Высоты БС и ПУ постоянны и считаются равными h_A и h_U соответственно.

Предполагается, что путь распространения сигнала на линии прямой видимости (Line-of-Sight, LoS) может быть заблокирован различным специализированным оборудованием, расположенным в заводских цехах. Вероятность блокировки в рассматриваемом сценарии получена в [3].

В данной работе учитываются как микро-, так и макромобильность ПУ. Первое относится к быстрым вращениям ПУ в руках пользователя [7, 8], что

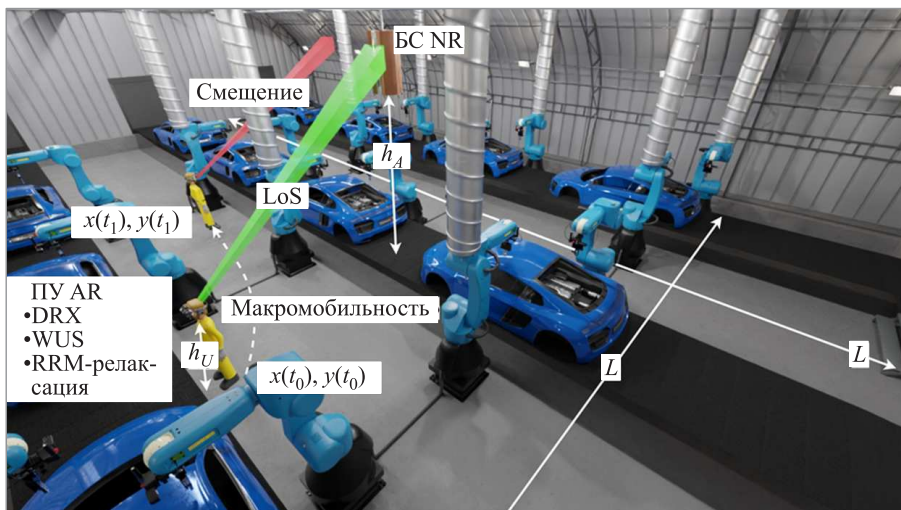


Рис. 1 Системная модель

приводит к потере направленности антенны на БС [9]. Для учета этого эффекта применяется модель, предложенная в [9], которая параметризуется с использованием статистических данных, представленных в [10] для приложений X-VR. Также используются модели распространения и антенн, описанные в [3].

В работе рассмотрены четыре комбинации механизмов энергосбережения:

- (1) DRX. Механизм энергосбережения DRX предполагает работу ПУ в двух циклах: коротком и длинном. В начале каждого цикла запускается таймер контроля состояния сети. Если данные для передачи поступили на ПУ, запускается режим приема/передачи данных. Если же в течение короткого цикла данные не были получены, то продолжительность следующего цикла увеличивается. Кроме того, если в течение периода мониторинга сети никакие данные не принимаются ПУ, в конце периода ПУ переходит в спящий режим до следующего цикла. Недостаток такого подхода заключается в том, что циклический мониторинг сети также подразумевает энергопотребление, которого невозможно избежать;
- (2) DRX + WUS. Сигнал WUS представляет собой сигнал пробуждения, имеющий синхронизацию с циклом DRX. В совокупности эти алгоритмы работают следующим образом. Пользовательское устройство настроено на работу в циклах DRX, а также на отслеживание сигнала WUS в строго заданный период времени. Если сигнал WUS не получен в течение ожидаемого интервала, ПУ засыпает и пропускает цикл DRX. Таким способом можно добиться большей экономии энергии за счет сокращения времени мониторинга сети;

- (3) DRX + RRM-релаксация. Помимо мониторинга сигнала в нисходящем контрольном канале PDCCH (Packet Downlink Control Channel) ПУ также необходимо отслеживать сигналы измерения уровня принимаемого сигнала RSRP (Received Signal Reference Power) и RSRQ (Received Signal Reference Quality). В режиме RRM-релаксации наблюдение за этими сигналами отсутствует. Ожидается, что эта схема обеспечит хорошую экономию энергии при низкой мобильности ПУ;
- (4) DRX + WUS + RRM-релаксация. Последняя рассматриваемая схема объединяет все три механизма сохранения энергии. Эта схема не обязательно окажется лучшей, поскольку ожидается, что энергоэффективность будет зависеть от мобильности и местоположения ПУ.

3 Математическая модель

Чтобы оценить энергопотребление ПУ для рассматриваемых схем энергосбережения, используется поглощающая цепь Маркова, представленная на рис. 2, которая на верхнем уровне имеет четыре состояния ($i = 1, \dots, 4$).

В предлагаемой модели учтены периоды обслуживания пакетов и периоды простоя. Предполагаем, что эти периоды имеют экспоненциальное распределение с параметрами λ_D (далее плотность распределения (ПР) обозначим $f_D(x)$) и λ_R с ПР $f_R(x)$ соответственно. Потеря активного соединения может произойти в результате микромобильности, макромобильности или перехода в другой режим RRM. Плотность распределения длительности непрерывного соединения ПУ с БС рассчитывается как минимум из трех случайных величин по формуле:

$$f_C(t) = \sum_{a,b,c \in \{M,R,B\}} f_a(t)(1 - F_b(t))(1 - F_d(t)),$$

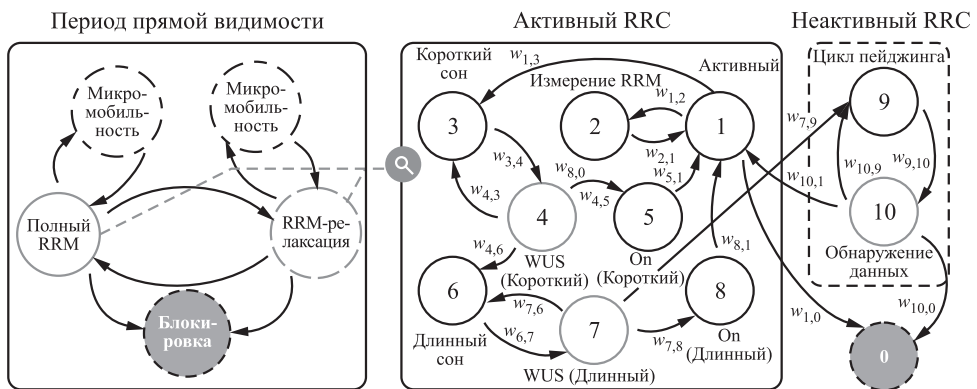


Рис. 2 Модель системы в виде поглощающей цепи Маркова

где $f_M(t)$ — плотность распределения длительности до наступления рассинхронизации лучей, $f_R(t)$ — до переключения режима RRM, а $f_B(t)$ — до наступления блокировки прямой видимости. Данные распределения предполагаются экспоненциальными с параметрами λ_M , λ_R и λ_B соответственно.

Вероятности переходов между состояниями верхней цепи условные, так как для перехода необходимо, чтобы остальные события произошли позже рассматриваемого:

$$w_{i,j} = \int_0^{\infty} f_j(t)(1 - F_y(t))(1 - F_B(t)) dt, \quad i, j, y = 1, \dots, 4, \quad i \neq j \neq y.$$

При этом, как можно заметить из рис. 2, нет переходов между состояниями микромобильности, а вероятность попадания в поглощающее состояние в момент t находится как $1 - F_B(t)$. Данный подход возможен благодаря свойству отсутствия последействия. Аналогичным способом определяются переходы между состояниями цепи второго уровня.

Мобильность пользователей представлена двумя независимыми процессами диффузии по осям Ox и Oy , ограниченными пределами помещения $(0, L)$. Будем считать, что БС находится в точке $(0, 0)$. Статистические свойства пользователя, перемещающегося в одномерном пространстве и заключенного в $(0, L)$, описываются функцией Грина $p(x, t|x_0, t_0)$, представляющей собой вероятность его нахождения в точке x в момент t вместе с начальными условиями $p(x, t|x_0, t_0) = \delta(x - x_0)$ и граничными условиями

$$\frac{\partial p(0, t|x_0, t_0)}{\partial x} = \frac{\partial p(L, t|x_0, t_0)}{\partial x} = 0.$$

Решение задачи может быть получено методом разделения переменных, как описано в [11–13]. В терминах бесконечного ряда это выражение выглядит как

$$p(x_0, t_0) = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[- \left(\frac{n\pi}{2} \right)^2 \frac{t - t_0}{\tau} \right] \cos \left(\frac{nx\pi}{L} \right) \cos \left(\frac{nx_0\pi}{L} \right),$$

где $\tau = L^2/D$ — время релаксации; D — коэффициент диффузии.

На рис. 3 изображена схема перемещения пользователя по нижней поверхности помещения из некоторого начального положения (x_0, y_0) в момент времени $t_0 = 0$ в положение $(x(t), y(t))$ со смещением направленных лучей антенн относительно друг друга.

Рассмотрим случайную величину $X(t)$, представляющую местоположение пользователя только по оси Ox в момент времени t . Можно заметить, что

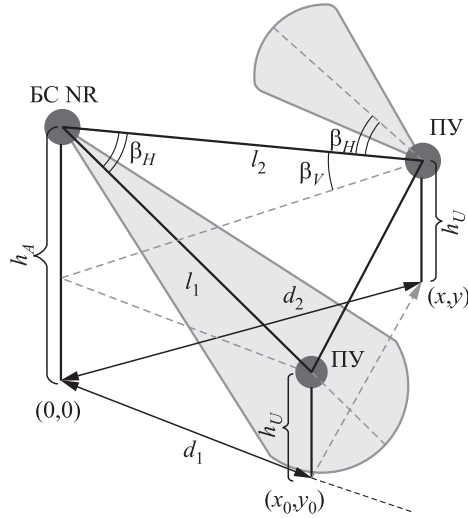


Рис. 3 Смещение луча в трехмерном пространстве

расстояние l_2 до БС и угол β_V расогласования антенны в момент t можно выразить как

$$l_2(t) = \sqrt{[X(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}; \quad \beta_V = \frac{X(t)}{\sqrt{[x(t)]^2 + (h_A - h_U)^2}}.$$

Обозначая местоположение пользователя по оси Y случайной величиной $Y(t)$, можно заметить, что $\tan(1 - \beta_H(t)) = Y(t)/x_0$. Это приводит к

$$\beta_H(t) = 1 - \arctan\left(\frac{Y(t)}{x_0}\right).$$

Спектральная эффективность в момент времени t может быть записана как

$$S_E(t) = 1 + \frac{P_T G_A(t) G_U(t) L(y, t)}{N_0 B + I_M},$$

где $G_A(t)$ и $G_U(t)$ — коэффициенты усиления антенн БС и ПУ с числом антенных элементов N_A и N_U соответственно в момент времени t ; $L(y, t)$ — потери в момент времени t ; N_0 — шум.

Пусть $B(t)$ — состояние траектории LoS в момент t , причем 1 и 0 означают заблокированное и незаблокированное состояния соответственно. Чтобы охарактеризовать динамику блокировки, необходимо оценить матрицу

$$P(t) = \begin{pmatrix} p_{00}(t) & 1 - p_{00}(t) \\ p_{10}(t) & 1 - p_{10}(t) \end{pmatrix}.$$

Используя условную вероятность, получаем

$$p_{00} = \frac{\Pr\{B(t) = 0, B(0) = 0\}}{\Pr\{B(0) = 0\}}; \quad p_{10} = \frac{\Pr\{B(t) = 0, B(0) = 1\}}{\Pr\{B(0) = 1\}}.$$

Так как процесс блокировки предполагается пуассоновским в R^2 , то знаменатель можно записать как

$$\Pr\{B(0) = 0\} = e^{-2\lambda_B r_B x_0}.$$

Используя свойство независимости пуассоновского точечного процесса, получаем, что $p_{00}(t)$ полностью определяется мобильностью ПУ:

$$p_{00}(t) = e^{-\lambda_B (2r_B \sqrt{E([X(t)] - x_0)^2 + (E[Y(t)])^2 - S})},$$

где $S = r_B^2 \cot(\alpha/2)$ — площадь пересечения зон блокировки LoS.

Аналогично можно найти $p_{10}(t)$ как

$$p_{10}(t) = \frac{(1 - e^{-\lambda_B (2r_B x_0 - S)}) e^{-\lambda_B S}}{1 - e^{-2\lambda_B r_B x_0}} e^{-\lambda_B (2r_B \sqrt{E([X(t)] - x_0)^2 + (E[Y(t)])^2 - S})}.$$

Заметим, что площадь S совместного пересечения зон блокировки LoS зависит от угла α , который сам является функцией от времени t из-за макромобильности ПУ. Используя теорему косинусов, определяем искомый угол как

$$\alpha(t) = \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab},$$

где параметры определяются как

$$a = \sqrt{(X(t))^2 + (Y(t))^2}; \quad b = \sqrt{(X(t) - x_0)^2 + (Y(t))^2}; \quad c = \sqrt{x_0^2}.$$

4 Численный анализ

В данном разделе проводится численный анализ влияния рассматриваемых комбинаций механизмов энергосбережения с параметрами системы, представленными в таблице, на энергоэффективность передачи данных и время полной разрядки аккумуляторной батареи ПУ.

На рис. 4, а представлен график зависимости энергоэффективности загрузки данных на ПУ от начального положения устройства. Как видно из рис. 4, а, энергоэффективность практически линейно падает с увеличением расстояния от пользователя до БС. При этом каждый из механизмов энергосбережения подтверждает свою эффективность: наибольший выигрыш дает применение

Системные параметры

Обозначение	Описание	Значения по умолчанию
λ_B	Плотность блокаторов	0,3 шт./м ²
r_B	Радиус блокатора	0,5 м
h_B	Высота блокатора	3 м
h_U	Высота ПУ	1,5 м
h_A	Высота тетрагерцевой БС	4 м
P_T	Излучаемая мощность на БС	2 Вт
N_A	Число конфигураций антенны БС	16 × 16
N_U	Число конфигураций антенны ПУ	2 × 2
N_O, I_M	Шум, интерференция	-84 дБи, -60 дБи
$\Delta\varphi, \Delta\theta$	Средняя скорость смещения вокруг осей	10 град/с
$\Delta x, \Delta y$	Средняя скорость смещения от осей	3 см/с
D	Коэффициент диффузии	1
L	Ширина помещения	50 м
G_A, G_U	Коэффициенты усиления антенн БС и ПУ	14,58 дБи, 2,57 дБи
λ_D	Средняя длительность передачи пакета	0,01 с
λ_R	Средняя длительность между поступлениями пакетов	1/60 с

WUS, который позволяет улучшить энергоэффективность до 10%, а совместное применение всех механизмов — до 15%. Обратим внимание, что использование механизма WUS более эффективно по сравнению с механизмом RRM-релаксации.

В то же время сильное влияние на энергоэффективность оказывает микро-мобильность пользователя, как показано на рис. 4, б. Здесь следует отметить, что при сохранении того же соотношения в эффективности рассматриваемых

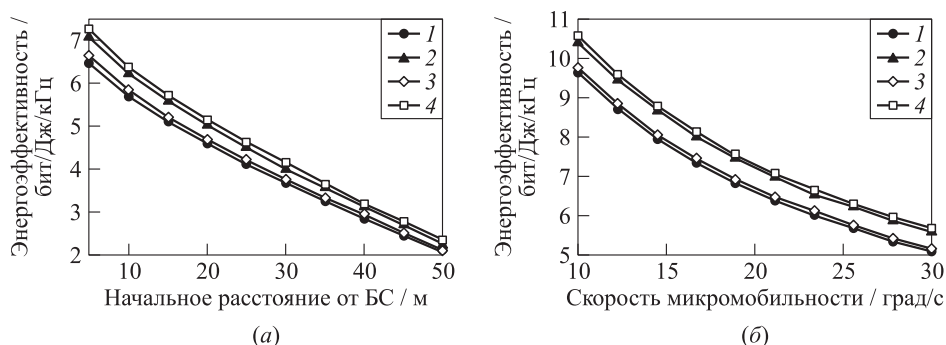


Рис. 4 Энергоэффективность передачи данных на ПУ в зависимости от начального положения устройства (а) и от скорости микро-мобильности (б): 1 — DRX; 2 — DRX + WUS; 3 — DRX + RRM-релаксация; 4 — DRX + WUS + RRM-релаксация

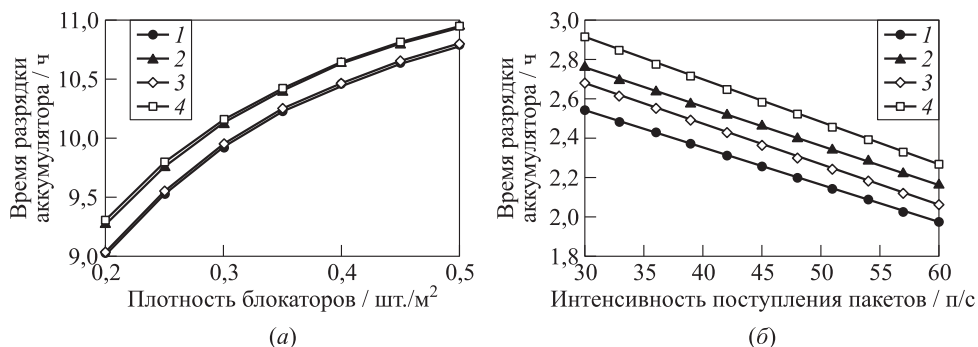


Рис. 5 Время разрядки аккумуляторной батареи ПУ в зависимости от интенсивности поступления пакетов (а) и от плотности блокаторов (б): 1 — DRX; 2 — DRX + WUS; 3 — DRX + RRM-релаксация; 4 — DRX + WUS + RRM-релаксация

механизмов повышение скорости микромобильности в 2 раза сокращает энергоэффективность более чем на треть.

На рис. 5, а показана зависимость времени разрядки аккумуляторной батареи ПУ от интенсивности поступления пакетов. Более высокая интенсивность приводит к коротким периодам простоя, что влечет за собой низкую эффективность стратегий энергосбережения. Время полной разрядки батареи сокращается до 20% при двукратном увеличении нагрузки. При этом разница в эффективности WUS и RRM-релаксации остается примерно на том же уровне.

Наконец, на рис. 5, б показана зависимость времени разрядки аккумулятора ПУ от плотности блокаторов. Увеличение времени разрядки также ожидаемо вследствие более частых простоев в передаче данных, возникающих по причине блокировки прямой видимости между ПУ и БС.

5 Заключение

В работе предложена математическая модель для сравнения стратегий совместного использования методов сбережения энергии, таких как DRX, WUS и RRM-релаксация, в промышленных условиях для VR-приложений. В качестве основных метрик рассмотрены энергоэффективность и время работы от батареи.

Численные результаты показали, что совмещение всех рассматриваемых механизмов энергосбережения наиболее эффективно с точки зрения рассматриваемых характеристик. В частности, использование WUS и RRM-релаксации позволяет увеличить время работы от батареи конечного устройства на 10%–15%. Эти значения сохраняются при изменении плотностей блокаторов и интенсивности поступления пакетов. При этом механизм WUS более эффективен по сравнению с RRM-релаксацией.

Планируется продолжить исследования с применением аппарата теории ресурсных систем массового обслуживания [14] для анализа сценариев с несколькими технологиями радиодоступа при предоставлении услуг AR/X-VR.

Литература

1. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface. ITU-R, 2017. Report M.2410-0.
2. *Beschastnyi V., Ostriкова D., Moltchanov D., Gaidamaka Y., Koucheryavy Y., Samouylov K.* Balancing latency and energy efficiency in mmWave 5G NR systems with multiconnectivity // *IEEE Commun. Lett.*, 2022. Vol. 26. No. 8. P. 1952–1956. doi: 10.1109/LCOMM.2022.3175663.
3. *Ostriкова D., Beschastnyi V., Moltchanov D., Gaidamaka Y., Koucheryavy Y., Samouylov K.* System-level analysis of energy and performance trade-offs in mmWave 5G NR systems // *IEEE T. Wirel. Commun.*, 2023. Vol. 22. Iss. 11. P. 7304–7318. doi: 10.1109/TWC.2023.3250092.
4. Study on support of reduced capability NR devices (Release 17): Technical Specification 38.875 V17.0.0. — 3GPP, 2021. 136 p. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.875/38875-h00.zip.
5. Radio Resource Control (RRC) protocol specification (Release 15): Technical Specification 38.331 V15.6.0. — 3GPP, 2019. 517 p. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.331/38331-f60.zip.
6. *Veedu S., Mozaffari M., Hoglund A., Yavuz E., Tirronen T., Bergman J., Wang J.* Toward smaller and lower-cost 5G devices with longer battery life: An overview of 3GPP release 17 RedCap // *IEEE Communications Standards Magazine*, 2022. Vol. 6. No. 3. P. 84–90. doi: 10.1109/MCOMSTD.0001.2200029.
7. *Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y., Jornet J. M.* The effect of small-scale mobility on terahertz band communications // *5th ACM Conference (International) on Nanoscale Computing and Communication Proceedings*. — New York, NY, USA: ACM, 2018. Art. 40. 2 p. doi: 10.1145/3233188.3242902.
8. *Singh R., Sicker D.* Parameter modeling for small-scale mobility in indoor THz communication // *Global Communications Conference*. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019. Art. 9013838. 6 p. doi: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013838.
9. *Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y., Jornet J. M.* Capacity and outage of terahertz communications with user micro-mobility and beam misalignment // *IEEE T. Veh. Technol.*, 2020. Vol. 69. No. 6. P. 6822–6827. doi: 10.1109/TVT.2020.2988600.
10. *Stepanov N. V., Moltchanov D., Begishev V., Turlikov A., Koucheryavy Y.* Statistical analysis and modeling of user micromobility for THz cellular communications // *IEEE T. Veh. Technol.*, 2021. Vol. 71. No. 1. P. 725–738. doi: 10.1109/TVT.2021.3124870.
11. *Bickel T.* A note on confined diffusion // *Physica A*, 2007. Vol. 377. No. 1. P. 4–32. doi: 10.1016/j.physa.2006.11.008.
12. *Ezekoye O. A.* Conduction of heat in solids // *SFPE handbook of fire protection engineering* / Eds. M. J. Hurley, D. Gottuk, J. R. Hall, *et al.* — 5th ed. — New York, NY, USA: Springer, 2016. P. 25–52. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0_2.

13. *Mortensen K. I., Flyvbjerg H., Pedersen J. N.* Confined Brownian motion tracked with motion blur: Estimating diffusion coefficient and size of confining space // *Frontiers Physics*, 2021. Vol. 8. Art. 583202. 15 p. doi: 10.3389/fphy.2020.583202.
14. *Горбунова А. В., Наумов В. А., Гайдамака Ю. В., Самуйлов К. Е.* Ресурсные системы массового обслуживания как модели беспроводных систем связи // *Информатика и её применения*, 2018. Т. 12. Вып. 3. С. 48–55. doi: 10.14357/19922264180307.

Поступила в редакцию 15.09.23

ANALYSIS OF JOINT USAGE OF ENERGY CONSERVATION STRATEGIES FOR 5G DEVICES WITH REDUCED CAPABILITY

V. A. Beschastnyi¹, E. S. Golos¹, D. Yu. Ostrikova¹, E. A. Machnev¹, V. S. Shorin², and Yu. V. Gaidamaka^{1,2}

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: The recently standardized Reduced capability (RedCap) user equipment (UE) type for 5G systems, New Radio (NR), supports new mechanisms to limit power consumption. Using a combination of Discontinuous Reception (DRX), Wake-Up Signal (WUS), and Radio Resource Management (RRM) relaxation techniques, RedCap-enabled UEs can provide high energy efficiency while meeting the speed requirements for a large set of applications. The present authors investigate the impact of the above mechanisms on the energy consumption of UEs in 5G NR networks. To this aim, the authors propose a mathematical model that captures the specifics of these mechanisms and environmental and deployment characteristics. Energy efficiency and battery life time are considered as the main characteristics. The numerical results demonstrate that combining all the considered energy saving mechanisms allows to improve the battery life time by 15%–20%. The WUS mechanism shows better performance as compared to the RRM relaxation. These conclusions hold for a wide range of input system parameters, including packet interarrival time and blockers density.

Keywords: 5G; New Radio; DRX; RedCap; WUS; RRM relaxation

DOI: 10.14357/08696527230407

EDN: KATMLB

Acknowledgments

The study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 23-79-10084 (<https://rscf.ru/project/23-79-10084>).

References

1. ITU-R. 2017. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface Report M.2410-0. Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410-2017> (accessed October 23, 2023).
2. Beschastnyi, V., D. Ostrikova, D. Moltchanov, Y. Gaidamaka, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov. 2022. Balancing latency and energy efficiency in mmWave 5G NR systems with multiconnectivity. *IEEE Commun. Lett.* 26(8):1952–1956. doi: 10.1109/LCOMM.2022.3175663.
3. Ostrikova, D., V. Beschastnyi, D. Moltchanov, Y. Gaidamaka, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov. 2023. System-level analysis of energy and performance trade-offs in mmWave 5G NR systems. *IEEE T. Wirel. Commun.* 22(11):7304–7318. doi: 10.1109/TWC.2023.3250092.
4. 3GPP. 2021. Study on support of reduced capability NR devices (Release 17): Technical Specification 38.875 V17.0.0. 136 p. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.875/38875-h00.zip (accessed October 23, 2023).
5. 3GPP. 2019. Radio Resource Control (RRC) protocol specification (Release 15): Technical Specification 38.331 V15.6.0. 517 p. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.331/38331-f60.zip (accessed October 23, 2023).
6. Veedu, S., M. Mozaffari, A. Høglund, E. Yavuz, T. Tirronen, J. Bergman, and J. Wang. 2022. Toward smaller and lower-cost 5G devices with longer battery life: An overview of 3GPP release 17 RedCap. *IEEE Communications Standards Magazine* 6(3):84–90. doi: 10.1109/MCOMSTD.0001.2200029.
7. Petrov, V., D. Moltchanov, Y. Koucheryavy, and J. M. Jornet. 2018. The effect of small-scale mobility on terahertz band communications. *5th ACM Conference (International) on Nanoscale Computing and Communication Proceedings*. New York, NY: ACM. Art. 40. 2 p. doi: 10.1145/3233188.3242902.
8. Singh, R., and D. Sicker. 2019. Parameter modeling for small-scale mobility in indoor THz communication. *Global Communications Conference*. Piscataway, NJ: IEEE. Art. 9013838. 6 p. doi:10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013838.
9. Petrov, V., D. Moltchanov, Y. Koucheryavy, and J. M. Jornet. 2020. Capacity and outage of terahertz communications with user micro-mobility and beam misalignment. *IEEE T. Veh. Technol.* 69(6):6822–6827. doi: 10.1109/TVT.2020.2988600.
10. Stepanov, N. V., D. Moltchanov, V. Begishev, A. Turlikov, and Y. Koucheryavy. 2021. Statistical analysis and modeling of user micromobility for THz cellular communications. *IEEE T. Veh. Technol.* 71(1):725–738. doi: 10.1109/TVT.2021.3124870.
11. Bickel, T. 2007. A note on confined diffusion. *Physica A* 377(1):24–32. doi: 10.1016/j.physa.2006.11.008.
12. Ezekoye, O. A. 2016. Conduction of heat in solids. *SFPE handbook of fire protection engineering*. Eds. M. J. Hurley, D. Gottuk, J. R. Hall, et al. New York, NY: Springer. 25–52. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0_2.
13. Mortensen, K. I., H. Flyvbjerg, and J. N. Pedersen. 2021. Confined Brownian motion tracked with motion blur: Estimating diffusion coefficient and size of confining space. *Frontiers Physics* 8:583202. 15 p. doi: 10.3389/fphy.2020.583202.

14. Gorbunova, A. V., V. A. Naumov, Y. V. Gaidamaka, and K. E. Samouylov. 2018. Resursnye sistemy massovogo obsluzhivaniya kak modeli besprovodnykh sistem svyazi [Resource queuing systems as models of wireless communication systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 12(3):48–55. doi: 10.14357/19922264180307.

Received September 15, 2023

Contributors

Beschastnyi Vitalii A. (b. 1992) — 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; beschastnyy-va@rudn.ru

Golos Elizaveta S. (b. 1998) — PhD student, Department of Probability Theory and Cyber Security, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; 1142210130@rudn.ru

Ostrikova Daria Yu. (b. 1988) — 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; ostrikova-dyu@rudn.ru

Machnev Egor A. (b. 1996) — PhD student, Department of Probability Theory and Cyber Security, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; 1042200071@rudn.ru

Shorgin Vsevolod S. (b. 1978) — 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; vshorgin@ipiran.ru

Gaidamaka Yuliya V. (b. 1971) — Doctor of Science in physics and mathematics, 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 119133, Russian Federation; gaydamaka-yuv@rudn.ru

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ СКОРОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАПРОСОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С УЧЕТОМ СМЫСЛОВОГО АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ

Т. К. Бирюкова¹, М. М. Гершкович²

Аннотация: Предложены способы повышения скорости выполнения функциональных запросов к хранилищам данных и снижения нагрузки на каналы связи в автоматизированных информационных системах (АИС). Ускорить выполнение запросов позволяет распределение данных по физическим средствам хранения с учетом смыслового содержания информации. Рекомендовано данные, участвующие в поиске, хранить на высокоскоростных носителях, а предназначенные для отображения — на обычных дисках меньшей стоимости. Поскольку скорость выполнения запросов зависит от быстродействия серверов, а часть их ресурсов тратится на резервное копирование данных, актуальна оптимизация этого процесса. Рассмотрен способ создания резервных копий с дифференциацией по видам информации, позволяющий снизить нагрузку на серверы. Оптимизация трафика между рабочими местами и хранилищами может быть реализована при каскадном накоплении информации в узлах иерархических АИС.

Ключевые слова: автоматизированная информационная система; информационно-аналитическая система; канал связи; информационный обмен; проектирование баз данных; запрос к базе данных; оптимизация запросов; резервное копирование

DOI: 10.14357/08696527230408

EDN: XUGJCO

1 Введение

Результативность работы пользователей крупных АИС в большой степени определяется скоростью выполнения функциональных запросов к хранилищам данных. В свою очередь, возможность быстрой выдачи данных из хранилищ зависит от следующих основных факторов:

- рациональная организация баз данных (БД);
- оптимальная настройка выполнения запросов средствами БД;
- оптимальный процесс резервного копирования — не снижающий производительность БД по записи новых данных и выполнению запросов;

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

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

- рациональный выбор технических средств для хранения (по стоимости, надежности, скорости работы);
- качественные каналы связи для передачи данных из БД пользователю.

В России в настоящее время создается большое число АИС, в том числе в рамках реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 (в ред. Указа Президента Российской Федерации от 15 марта 2021 г. № 143) [1], а также с целью выполнения программы «Цифровая экономика Российской Федерации», принятой Правительством РФ в 2017 г. [2]. С начальных этапов разработки АИС важно уделять особое внимание рациональному проектированию хранилищ данных как основной части системной архитектуры, методам их наполнения, способам информационного обмена между элементами хранилищ, а также с пользователями, поскольку эти аспекты основополагающие — их изменение на заключительных этапах создания АИС либо невозможно, либо очень трудоемко и влечет существенные материальные затраты [3].

В статье [4] авторами предложен способ оптимизации БД путем предотвращения дублирования информационных объектов (ИО), формируемых по поступающим в АИС данным о событиях, происходящих с ИО, а также путем автоматической установки связей в БД между «похожими» по определенным критериям ИО, с тем чтобы поиск и анализ информации о «сложном ИО», состоящем из «похожих» ИО, мог выполняться как для единого ИО. Под ИО здесь понимается совокупность характеристик (атрибутов) некоторой сущности. В работе [5] представлен метод управления передачей элементов данных между узлами территориально распределенной АИС, направленный на скорейшую доставку наиболее ценной информации для пользователя, где логическим блокам данных при передаче по каналам связи назначаются приоритеты в зависимости от смыслового содержания. В настоящей статье в продолжение вышеупомянутых исследований предложены способы рациональной организации БД в территориально распределенных АИС, а также методы оптимизации хранения данных в БД и создания резервных копий с учетом дифференциации информации по смыслу.

2 Преимущества каскадного накопления информации в иерархических территориально распределенных автоматизированных информационных системах

Структура узлов больших территориально распределенных АИС во многих случаях иерархическая в соответствии со структурой оснащаемых объектов — в силу иерархического административно-территориального деления государства, иерархической структуры государственных органов власти и управления, а также крупных коммерческих структур. При проектировании АИС важно определить

стратегию накопления информации в узлах АИС в соответствии с особенностями задач по использованию этой информации — например, нужно ли всем пользователям АИС иметь доступ ко всей информации системы или только (или преимущественно) к информации, собираемой в узлах, относящихся к зоне ответственности конкретного объекта информатизации. Нужно также учитывать, что при интенсивном взаимодействии пользователей с хранилищами АИС возникают существенные потоки данных от БД АИС к автоматизированным рабочим местам (АРМ), поэтому предъявляются высокие требования к качеству каналов связи между АРМ и БД АИС, в том числе к оборудованию. Необходимо отметить, что многие крупные информационные системы содержат данные, которые должны быть защищены при передаче, а средства защиты информации, как правило, снижают пропускную способность каналов.

Один из способов снижения нагрузки на каналы связи и, соответственно, стоимости их создания и использования — это каскадное накопление информации в узлах АИС, когда все данные из узлов нижнего уровня передаются в вышестоящие по иерархии узлы и накапливаются в них. Соответствующая схема изображена на рис. 1.

Основные преимущества каскадного принципа накопления информации по сравнению с вариантами, когда информация из всех узлов передается в один (основной) узел системы и накапливается только в нем либо когда информация

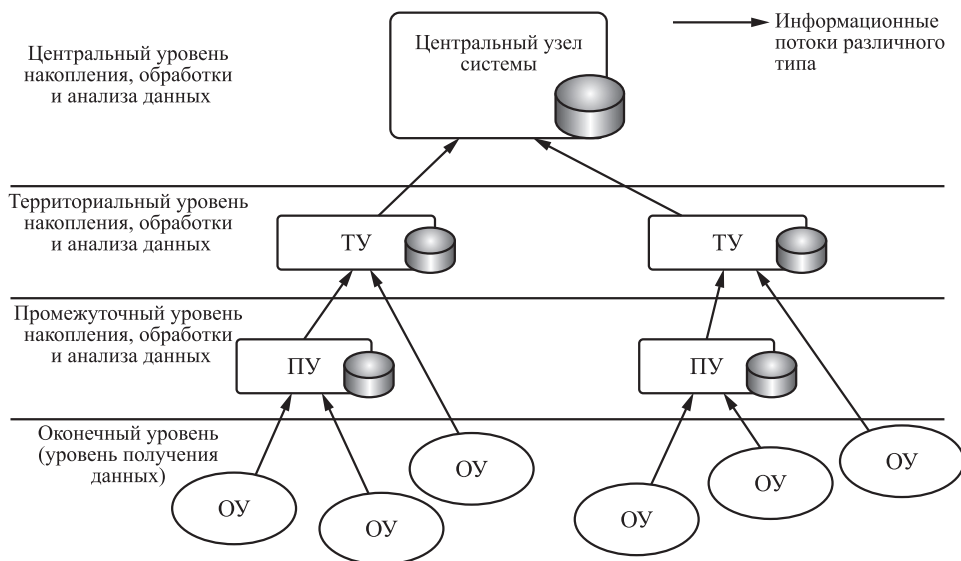


Рис. 1 Схема каскадного накопления информации в узлах иерархической территориально распределенной АИС: ТУ — территориальный узел; ПУ — промежуточный узел; ОУ — окончательный узел

в каждом узле накапливается автономно и не передается в другие узлы, можно сформулировать следующим образом.

Преимущество № 1. Как правило, для решения задач назначения АИС в вышестоящих по иерархии узлах требуется информация, собираемая в нижестоящих узлах. Если узел содержит всю информацию из нижестоящих узлов, то пользователи узла имеют возможность получать такую информацию из БД этого узла, не загружая запросами внешние каналы связи (соединяющие узел с нижестоящими узлами). При этом, поскольку локальные каналы на объектах, как правило, имеют лучшие характеристики, чем внешние каналы, ответы на запросы будут поступать быстрее.

Преимущество № 2. Математико-статистические методы анализа данных эффективнее реализуются на единой БД, чем на распределенной.

Преимущество № 3. Если накапливать информацию только в одном (основном) узле системы, то необходимо обеспечить интерфейс всех территориально распределенных АРМ системы с центральной БД, что требует организации соответствующих каналов связи и влечет дополнительные затраты по сравнению с вариантом, когда пользователи узла обращаются с запросами к БД этого узла. При этом следует отметить, что поиск в локальной БД узла (содержащей информацию из нижестоящих по иерархии узлов) в ряде случаев может быть существенно эффективнее, чем в центральной БД, поскольку в локальной БД нет лишней информации из узлов, не относящихся к зоне ответственности соответствующего объекта.

Преимущество № 4. В работе [6] указано, что для катастрофоустойчивости АИС помимо организационных мер защиты, таких как пожаробезопасность, грозозащита, и обеспечения сохранности информации необходимо предусмотреть возможность функционирования отдельных центров обработки информации в случае аварии. Каскадное накопление данных повышает катастрофоустойчивость АИС, поскольку обеспечивается возможность функционирования работоспособной части системы при выходе из строя некоторых узлов или каналов связи. Пользователи исправных узлов могут без ограничений работать с накопленной в БД узлов информацией. Повышается также надежность хранения данных, поскольку возможность восстановления информации в узле после аварии (помимо восстановления из резервной копии) обеспечивается наличием той же информации в нижестоящих и в вышестоящих по иерархии узлах.

В условиях когда пользователи на объекте, где размещен узел АИС, обращаются в основном к БД этого узла, необходимо стремиться к оптимизации хранения данных в каждом из узлов — как с целью уменьшения стоимости оборудования узлов (особенно в крупных АИС с большим числом узлов), так и для повышения скорости выполнения запросов. Таким образом, актуальными становятся следующие задачи:

- оптимальная организация структуры ИО в БД и установки связей между ИО (с целью решения этой задачи в [4] предложены методы идентификации

- и кластеризации ИО, формируемых из поступающего в АИС потока данных о событиях);
- рациональный выбор физических носителей для размещения данных с учетом смыслового содержания информации.

3 Способ повышения быстродействия автоматизированных информационных систем путем рационального выбора физических средств хранения для размещения разных видов данных

В настоящее время активно разрабатываются методы автоматической структуризации текстовых данных в зависимости от смысла слов или фрагментов текста с целью ускорения поиска, выполнения классификации текстов [7], выделения специальных атрибутов. Так, в статье [8] приведен способ выявления конфиденциальной информации в тексте. Наряду с указанными лингвистическими задачами разделение информации по смыслу позволяет оптимизировать хранение данных и ускорить доступ к ним.

Быстродействие АИС в целом (скорость вставки данных в БД и их извлечения из БД, скорость выполнения запросов к БД, в том числе сложных, с большим числом условий) определяется рациональной организацией хранилищ данных. Предлагается метод распределения данных по физическим средствам хранения разных типов в зависимости от смыслового содержания информации.

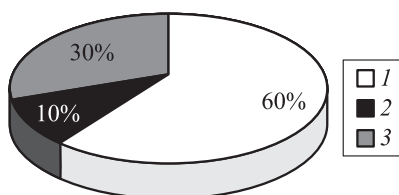


Рис. 2 Типовое распределение данных по видам в реляционных БД: 1 — изображения; 2 — текстовые данные; 3 — индексная информация

В процессе изучения различных АИС [9, 10] было установлено, что во многих системах, содержащих данные об ИО с изображениями, например фотографиями, распределение данных по видам в реляционных БД приблизительно следующее: 60% — изображения; 10% — текстовые данные; 30% — индексная информация БД (рис. 2). Такой объем индексной информации обеспечивает необходимое быстродействие в системе.

При выполнении запросов наиболее важно обеспечить быстрое выполнение операций чтения и записи текстовых и индексных данных, поскольку пользователи чаще всего ждут быстрых ответов на запросы по текстовой информации и такие запросы выполняются чаще, чем, например, поиск по фотографиям. Поэтому наиболее рациональный способ — часть информационного хранилища, содержащую текстовые данные и индексы БД, разместить на физических носителях, обеспечивающих высокую скорость операций чтения и записи, таких как диски SSD (solid-state drive). Часть информационного хранилища, содержащую фотографии и другие биометрические данные, которые имеют большой объем, но

при этом используются только для отображения и не участвуют в поиске, можно хранить на дисках HDD (hard disk drive), имеющих существенно меньшую стоимость по сравнению с высокоскоростными дисками при одинаковом размере дискового пространства.

Отдельная проблема — обеспечение рационального хранения данных, необходимых для поиска ИО по фотографиям. С целью объяснения преимуществ предложенного способа хранения фотоизображений ниже приводятся основные принципы современных методов сравнения фотографий. Поиск по фотографии в БД подразумевает сравнение эталонной фотографии со всеми фотографиями в БД и выдачу ранжированного списка фотографий, «похожих» на эталонную. В информационном хранилище для каждой фотографии дополнительно содержится так называемый ключ фотографии — вектор, содержащий «основные черты» изображения. В современных методах распознавания по фотографии для построения ключей используются нейронные сети. Размер вектора выбирает разработчик нейронной сети (обычно до 1 КБ). Сравнение фотографий выполняется путем сравнения ключей. Для поиска по эталонной фотографии ее ключ сравнивается с ключами всех фотографий, хранящихся в БД. Основное время при поиске по фотографиям тратится на считывание ключей всех фотографий с диска, поэтому способ хранения ключей существенно влияет на скорость поиска.

Для выполнения быстрого поиска по фотографиям ключи предлагается хранить на «высокоскоростных» дисках в нескольких файлах, части которых кешируются в оперативной памяти (с целью уменьшения числа операций чтения с диска), а сами файлы фотографий — на физических носителях, характеризующихся высокой скоростью чтения. Сервер, где работает программное обеспечение поиска по фотографиям, должен иметь большой объем оперативной памяти. Рекомендуется ключи фотографий помимо размещения в указанных файлах (используемых для обеспечения быстрого поиска) хранить также и в реляционной БД на таких же дисках, что и сами фотографии, поскольку резервное копирование реляционной БД выполняется штатными средствами системы управления базами данных (СУБД) и данные легко можно восстановить из резервной копии. Итак, рекомендуется части реляционной БД размещать следующим образом:

- текстовые и индексные данные хранить на физических носителях, обеспечивающих высокую скорость операций чтения и записи («быстрых» дисках), например на дисках SSD;
- фотографии и другие биометрические данные хранить на физических носителях HDD, характеризующихся меньшей стоимостью по сравнению с «быстрыми» дисками при одинаковом размере дискового пространства;
- ключи фотографий, используемые для поиска по фотографиям, размещать в нескольких файлах на «быстрых» дисках, а также сохранять ключи в реляционной БД на таких же дисках, что и фотографии, — для резервного копирования средствами СУБД вместе со всеми остальными данными.

4 Рациональный способ резервного копирования баз данных с дифференциацией по видам информации

Операции резервного копирования БД требовательны к ресурсам серверов (вследствие больших объемов данных), поэтому актуален выбор оптимального способа резервного копирования, с тем чтобы избежать снижения производительности БД по выполнению запросов и записи новых данных. Предлагается резервное копирование данных, хранящихся в реляционных БД, организовать с учетом смыслового содержания информации. Процедуру копирования рекомендуется выполнять штатными средствами СУБД, но регламент копирования установить с учетом видов данных. Информацию разных видов целесообразно сохранять в разных файлах реляционной БД. Так, файлы со «старой» информацией, резервное копирование которых уже выполнялось, не требуют нового резервного копирования. Поэтому ресурсы системы, связанные с резервным копированием, имеет смысл тратить на копирование новых данных, а также технологических (включая журналы событий операционной системы, СУБД, приложений) и индексных данных, которых мало в процентном отношении к давно хранящимся данным.

Для фотографий рекомендуется выделять отдельные файлы реляционной БД и устанавливать для них отдельный регламент резервного копирования. Фотографии, поступающие в информации о новых событиях, во многих случаях уже имеются в БД — такие фотографии не следует вновь вносить в БД. Тогда файл БД с «новыми» фотографиями (для которого еще не создавалась резервная копия) будет пополняться не очень быстро. Поэтому резервное копирование файлов БД с новыми фотографиями следует выполнять реже, чем файлов БД с новыми данными о событиях, а также технологическими и индексными данными. При этом для ускорения резервное копирование файлов БД рекомендуется делать сразу на несколько физических дисков.

5 Заключение

В работе сформулированы основные факторы, влияющие на скорость выполнения функциональных запросов к хранилищам данных в крупных территориально распределенных АИС. Отмечено, что каскадный принцип накопления информации в узлах иерархической территориально распределенной АИС, когда каждый вышестоящий по иерархии узел получает и накапливает все данные из нижестоящих узлов, позволяет оптимизировать нагрузку на каналы связи между АРМ пользователей и хранилищами данных, а также в ряде случаев повысить эффективность поисковых запросов.

С целью ускорения выполнения пользовательских запросов предложен метод распределения данных по физическим средствам хранения разных типов в зависимости от смыслового содержания информации — рекомендовано данные, по которым проводится поиск, хранить на физических носителях, обеспечива-

ющих высокую скорость операций чтения и записи, а данные, используемые только для отображения, на обычных носителях, характеризующихся меньшей стоимостью. Предложено установить регламент резервного копирования БД с дифференциацией по видам информации.

Литература

1. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642. <http://kremlin.ru/acts/bank/41449>.
2. Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации»: Распоряжение Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р. <http://government.ru/docs/28653>.
3. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С. Некоторые вопросы оценки внутреннего качества информационных систем // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 1. С. 63–72. doi: 10.14357/08696527220106. EDN: NULTQH.
4. Гершкович М. М., Бирюкова Т. К. Задачи идентификации информационных объектов в распределенных массивах данных // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 1. С. 224–241. doi: 10.14357/08696527140114. EDN: SJHVPRT.
5. Гершкович М. М., Бирюкова Т. К. Метод управления обменом данными в автоматизированных информационных системах с применением смыслового анализа передаваемых элементов информации // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 4. С. 69–76. doi: 10.14357/08696527220407. EDN: JIJEMI.
6. Будзко В. И., Беленков В. Г., Кейдер П. А. К выбору варианта построения катастрофоустойчивых информационно-телекоммуникационных систем // Системы и средства информатики, 2003. Вып. 13. С. 16–40.
7. Шарнин М. М., Кузнецов И. П. Особенности семантического поиска информационных объектов на основе технологии баз знаний // Информатика и её применения, 2012. Т. 6. Вып. 2. С. 113–121. EDN: OZIORV.
8. Будзко В. И., Ядринцев В. В., Соценков И. В., Королев В. И., Беленков В. Г. Об одном подходе к формированию высокой неопределенности маркеров конфиденциальности в системах интенсивного использования данных // Информатика и её применения, 2020. Т. 14. Вып. 4. С. 69–76. doi: 10.14357/19922264200410. EDN: XBRCMX.
9. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Информационное взаимодействие в распределенных системах ситуационного управления. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2021. 268 с.
10. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Концептуальные подходы к обеспечению межведомственного информационного взаимодействия // Информатика: проблемы, методы, технологии: Мат-лы XXII Междунар. научн.-практич. конференции им. Э. К. Алгаинова. — Воронеж: Вэлборн, 2022. С. 923–929. EDN: KJHGIP.

Поступила в редакцию 31.08.23

METHODS FOR OPTIMIZING THE SPEED OF PERFORMING FUNCTIONAL REQUESTS IN AUTOMATED INFORMATION SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE SEMANTIC ANALYSIS OF INFORMATION

T. K. Biryukova and M. M. Gershkovich

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

Abstract: The article suggests the ways to increase the speed of execution of functional queries to databases in large automated information systems (AIS). The cascade principle of information accumulation when each node of a hierarchical territorially distributed AIS receives and accumulates all data from “lower” nodes, allows optimizing the traffic on communication channels between user workstations and databases. In some cases, this principle also increases the efficiency of search queries. In order to further accelerate the execution of queries, the authors propose a method for distributing data among physical storage media depending on the semantic content of the information. The authors recommend storing the “search data” on high-speed and high-capacity physical media. “Display-only” data may be stored on relatively slow and cheap (conventional) media. Since the performance of servers affects the speed of performing search queries and a part of server resources is spent on database backup, it is important to choose the optimal backup method. The authors propose to set up protocols (procedures) for data backup depending on the type of information.

Keywords: automated information system; information-analytical system; communication channel; information exchange; database design; database query; query optimization; database backup

DOI: 10.14357/08696527230408

EDN: XUGJCO

References

1. O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii: Ukaz Prezidenta ot 01.12.2016 No.642 [About Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation. Presidential Decree No.642 dated December 01, 2016]. Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/fles/ru/uZiATIOJiq5tZsJgqcZLY9Yl8PWTXQb.pdf> (accessed October 26, 2023).
2. Ob utverzhdenii programmy “Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii”: Rasporyazhenie Pravitel’sтва RF ot 28.07.2017 No.1632-r [Approval of the program “Digital economy of the Russian Federation”. Order of the Government of RF No. 1632-r dated July 28, 2017]. Available at: <http://government.ru/docs/28653> (accessed October 26, 2022).
3. Zatsarinnyy, A. A., and Yu. S. Ionenkov. 2022. Nekotorye voprosy otsenki vnutrennego kachestva informatsionnykh sistem [Some issues of internal quality assessment

- of information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(1):63–72. doi: 10.14357/08696527220106. EDN: NULTQH.
4. Gershkovich, M. M., and T. K. Biryukova. 2014. Zadachi identifikatsii informatsionnykh ob"ektov v raspredelennykh massivakh dannykh [The tasks of identification of informational objects in area-spread data arrays]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(1):224–241. doi: 10.14357/08696527140114. EDN: SJHVPT.
 5. Gershkovich, M. M., and T. K. Biryukova. 2022. Metod upravleniya obmenom dannyimi v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh s primeneniem smyslovogo analiza peredavaemykh elementov informatsii [The method of data exchange management in automated information systems with semantic analysis of transmitted information elements]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(4):69–76. doi: 10.14357/08696527220407. EDN: JIJEMI.
 6. Budzko, V. I., V. G. Belenkov, and P. A. Keyyer. 2003. K vyboru varianta postroeniya katastrofoustoychivyykh informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem [To the choice of solutions for building disaster-resistant information and telecommunication systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 13:16–40.
 7. Sharnin, M. M., and I. P. Kuznetsov. 2012. Osobennosti semanticheskogo poiska informatsionnykh ob"ektov na osnove tekhnologii baz znaniy [Semantic search of natural language information on the basis of knowledge base technology]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 6(2):113–121. EDN: OZIORV.
 8. Budzko, V. I., V. V. Yadrintsev, I. V. Sochenkov, V. I. Korolev, and V. G. Belenkov. 2020. Ob odnom podkhode k formirovaniyu v usloviyakh vysokoy neopredelennosti markerov konfidentsial'nosti v sistemakh intensivnogo ispol'zovaniya dannykh [Extraction of confidentiality markers from texts under conditions of high uncertainty in systems with data intensive usage]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 14(4):69–76. doi: 10.14357/19922264200410. EDN: XBRCMX.
 9. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Suchkov. 2021. *Informatsionnoe vzaimodeystvie v raspredelennykh sistemakh situatsionnogo upravleniya* [Information interaction in distributed systems of situational control]. Moscow: TORUS PRESS. 268 p.
 10. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Suchkov. 2022. Kontseptual'nye podkhody k obespecheniyu mezhvedomstvennogo informatsionnogo vzaimodeystviya [Conceptual approaches to ensuring interdepartmental information interaction]. *Informatika: problemy, metody, tekhnologii: Mat-ly XXII Mezhdunar. nauchn.-praktich. konferentsii im. E. K. Alginova* [Informatics: Problems, Methods, and Technologies. 22nd Scientific and Practical Conference (International) named after E. K. Alginova Proceedings]. Voronezh: Velborn. 923–929. EDN: KJHGIP.

Received August 31, 2023

Contributors

Biryukova Tatiana K. (b. 1968) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; yukonta@mail.ru

Gershkovich Maksim M. (b. 1968) — senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; makmg@mail.ru

МЕТОД КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ*

К. К. Абгарян¹, Н. Л. Загордан², Ю. Д. Мочалова³

Аннотация: Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в авиационно-космической отрасли. Создание новых материалов с требуемыми характеристиками на сегодня стало одним из важнейших направлений развития отрасли, особенно в связи с необходимостью оперативного решения вопросов, связанных с импортозамещением. В работе приведены результаты расчета эффективных упругих характеристик многослойных ПКМ с разноориентированной структурой армирования слоев. Использована модель армированного материала, основанная на предположении, что композиционный материал состоит из квазиоднородных трансверсально изотропных идеально соединенных слоев. Полученные результаты расчетов хорошо согласуются как с экспериментальными данными, так и с результатами расчетов коммерческих пакетов и могут быть использованы для автоматизации научных и инженерных расчетов при подборе компонентов и методологии их укладки по заданным характеристикам ПКМ.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; многослойные полимерные композиционные материалы; упругие характеристики

DOI: 10.14357/08696527230409

EDN: DPZJSX

1 Введение

В настоящее время переход к передовым цифровым, интеллектуальным, производственным технологиям, новым материалам и способам их конструирования стал одним из важнейших направлений в развитии нашей страны, реализация которого позволит ускоренными темпами решить проблему импортозамещения. Модернизация промышленного производства требует скорейшего создания новых материалов с заданными свойствами для их применения в разных областях, включая авиационно-космическую отрасль, микроэлектронику, медицину и др.

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

¹ Федеральний исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, kristal83@mail.ru

² Федеральний исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, zagordann@gmail.com

³ Федеральний исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, juliamochalova96@gmail.com

Разработка программных систем, базирующихся на применении оригинальных методов программной инженерии, дает возможность автоматизировать процесс научных и инженерных исследований, наиболее эффективно применять методы многомасштабного компьютерного моделирования и анализа данных для достижения целей опережающего развития в области создания новых материалов.

Сегодня компьютерное моделирование позволяет существенно ускорить и удешевить процессы создания новых материалов. В современных силовых конструкциях активно применяют многослойные ПКМ. Проектирование деталей из ПКМ — сложная задача, требующая расчета оптимальных характеристик материала, которые будут зависеть от числа монослоев ПКМ, их упруго-жесткостных свойств и способа их укладки.

Расчет характеристик многослойных ПКМ также является важной задачей при эксплуатации изделий из ПКМ, так как ремонт агрегатов в зонах выявленных дефектов, в том числе и с неоригинальными компонентами, требуется конструкциям на протяжении всего жизненного цикла. Например, ремонты конструктивных элементов планера летательного аппарата становятся неотъемлемой частью его эксплуатации. Многослойные ПКМ из стеклотканей и клеевых пленок применяются в хвостовой и носовой областях консольной части крыла, в обтекателях механизмов закрылков и законцовках стабилизаторов используются углеленты, стеклоткани и клеевые пленки. При выявлении дефектов таких агрегатов остро стоит задача подбора компонентов из доступных на рынке материалов и выбора технологии ремонта таким образом, чтобы механико-прочностные характеристики агрегатов после ремонта дефектной зоны не ухудшались. Однако задача расчета характеристик композиционного материала в области ремонта остается нетривиальной даже при знании характеристик монослоев ПКМ. Применение методов компьютерного моделирования с использованием программной системы, позволяющей рассчитывать упругие характеристики многослойных ПКМ, дает возможность автоматизировать научные и инженерные расчеты при подборе оптимальных компонентов и методологии их укладки по заданным характеристикам ПКМ.

2 Метод моделирования упругих характеристик полимерных композиционных материалов

Развитие высокопроизводительных вычислительных комплексов и прикладных программных средств позволило проводить исследования структур и свойств композиционных материалов с применением многомасштабного компьютерного моделирования [1–3]. При этом можно выделить 4 основных пространственно-временных уровня описания поведения материала: атомно-кристаллический, молекулярно-динамический, мезоскопический и континуальный.

В работе [4] представлен программный комплекс, позволяющий моделировать структурные свойства композиционного материала на основе многомасштабного

подхода. В настоящей работе класс моделируемых комплексом [4] композиционных материалов дополнен многослойным материалом, состоящим из разноориентированных монослоев однонаправленного волокна, пропитанного связующим. В соответствии с предлагаемым методом свойства монослоев вычисляются на атомно-кристаллическом и наноуровне с применением методов молекулярной динамики при условии их успешной валидации. Полученные данные передаются на мезоуровень, где рассчитываются упругие характеристики гомогенизированного монослоя. Вычисленные свойства монослоев поступают в базу данных свойств материалов программного комплекса [4] и используются в качестве входных данных для моделирования эффективных упругих характеристик многослойного композиционного материала с разноориентированной структурой армирования. Программно реализованный модуль позволяет вычислять эффективные свойства многослойного материала. При развитии программного комплекса [4] предполагается использование вычисленных свойств монослоев для решения обратной задачи — проектирования многослойного композиционного материала с заданными макроскопическими характеристиками.

В методе предполагается, что известны определяющие свойства монослоя: модуль упругости слоя вдоль волокон E_1 , модуль упругости слоя поперек волокон E_2 , модуль сдвига слоя поперек волокон G_{12} и коэффициент Пуассона ν_{12} .

В соответствии с законом Гука коэффициенты матрицы жесткости

$$G^0 = (g_{11}^0 \ g_{12}^0 \ g_{16}^0 \ g_{21}^0 \ g_{22}^0 \ g_{26}^0 \ g_{61}^0 \ g_{62}^0 \ g_{66}^0)$$

для монослоя однонаправленного композиционного материала при плоском напряженном состоянии имеют вид [5]:

$$g_{11}^0 = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}; \quad g_{12}^0 = g_{21}^0 = \frac{E_1\nu_{21}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}; \quad g_{22}^0 = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}};$$

$$g_{66}^0 = G_{12}, \quad g_{61}^0 = g_{62}^0 = g_{16}^0 = g_{26}^0 = 0; \quad \nu_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{E_1}.$$

При плоском напряженном состоянии коэффициенты матрицы жесткости могут быть записаны через независимые коэффициенты V_k , являющиеся инвариантами характеристик жесткости:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{3g_{11}^0 + 2g_{12}^0 + 3g_{22}^0 + 4g_{66}^0}{8}; \\ V_2 &= \frac{g_{11}^0 - g_{22}^0}{2}; \\ V_3 &= \frac{g_{11}^0 - 2g_{12}^0 + g_{22}^0 - 4g_{66}^0}{8}; \\ V_4 &= \frac{g_{11}^0 - 2g_{12}^0 + g_{22}^0 + 4g_{66}^0}{8}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При повороте волокнистого материала на угол θ в плоскости укладки слоя коэффициенты симметричной матрицы жесткости

$$G' = (g'_{11} \ g'_{12} \ g'_{16} \ g'_{12} \ g'_{22} \ g'_{26} \ g'_{16} \ g'_{26} \ g'_{66})$$

можно вычислить по формулам:

$$\left. \begin{aligned} g'_{11} &= V_1 + V_2 \cos 2\theta + V_3 \cos 4\theta; \\ g'_{12} &= V_1 - 2V_4 - V_3 \cos 4\theta; \\ g'_{16} &= \frac{1}{2} V_2 \sin 2\theta + V_3 \sin 4\theta; \\ g'_{22} &= V_1 - V_2 \cos 2\theta + V_3 \cos 4\theta; \\ g'_{26} &= \frac{1}{2} V_2 \sin 2\theta - V_3 \sin 4\theta; \\ g'_{66} &= V_4 - V_3 \cos 4\theta. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Используя приведенные выше коэффициенты матриц жесткостей монослоев, можно определить упругие характеристики для композиционного материала, состоящего из нескольких разноориентированных слоев однонаправленного материала.

При растяжении однонаправленного слоистого композиционного материала под углом θ к направлению армирования эффективный модуль упругости E''_x можно рассчитать по формуле:

$$E''_x = \frac{\Delta G'}{g'_{22}g'_{66} - (g'_{26})^2}, \quad (3)$$

где $\Delta G'$ — определитель матрицы жесткости G' .

При укладке однонаправленных слоев композита по технологии перекрестного армирования, когда многослойный композит состоит из $2n$ слоев, n из которых уложены под углом θ и n слоев — под углом $-\theta$ относительно оси симметрии укладки, модуль упругости такого композита в направлении оси x равен

$$E^{\#}_x = g'_{11} - \frac{g'^2_{12}}{g'_{22}}. \quad (4)$$

3 Результаты расчетов

Для верификации результатов расчета эффективной упругости многослойного композиционного материала было проведено сравнение экспериментальных данных [6–8] с результатами численного моделирования. Также результаты расчета сравнивались с результатами численного моделирования упругих характеристик в программном комплексе Ansys Composite PrePost (АСР), позволяющем в явном виде задавать свойства монослоев, структуру укладки многослойных

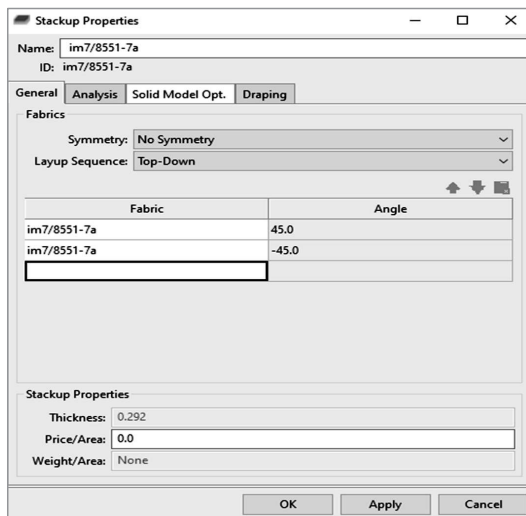


Рис. 1 Форма проектирования многослойного материала в АСР

композитных материалов, рассчитывать и визуализировать упруго-жесткостные свойства проектируемых материалов (рис. 1).

В проведенных численных экспериментах рассчитывались упругие свойства перекрестно армированного материала из 48 слоев. Все слои были выполнены из материала IM7/8551-7a, состоящего из углеродного волокна IM7 и связующего — эпоксидной смолы 8551-7a. Упругие свойства материала IM7/8551-7a доступны в открытых источниках: $E_1 = 144,9$ ГПа; $E_2 = 8,8$ ГПа; $G_{12} = 4,8$ ГПа; $\nu_{12} = 0,36$.

На рис. 2 представлен экспериментальный и расчетные графики зависимости эффективного модуля упругости от угла армирования θ , изменяющегося от 0° до 90° , для перекрестно армированного материала. Видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с данными численных экспериментов, полученных как в рамках расчета модуля упругости с использованием соотношений (1) и (2), так и полученных при использовании модуля АСР.

Рисунок 3 иллюстрирует хорошее качественное и количественное согласие экспериментальных и расчетных данных: относительное отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 5%. Величины модуля упругости, полученные по соотношениям (1), (2) и (4) и в приложении АСР, практически совпадают: относительная величина отклонения не превышает 1%.

На рис. 4 показаны результаты расчета модулей упругости перекрестно армированного композиционного материала AS4/3502, состоящего из однонаправленных углеродных волокон и связующего из смолы. Для расчета использованы данные о свойствах из открытых источников: $E_1 = 127,65$ ГПа; $E_2 = 11,32$ ГПа;

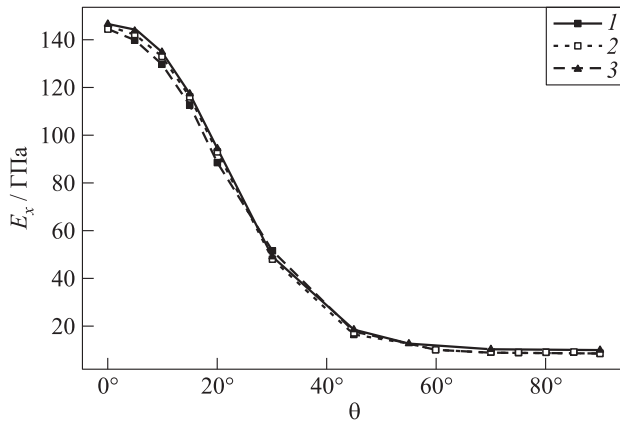


Рис. 2 Зависимость модуля упругости $E_x^\#$ от угла армирования θ для многослойного композиционного материала IM7/8551-7a: 1 — эксперимент; 2 — расчет с использованием соотношений (1) и (2); 3 — численные эксперименты в АСР

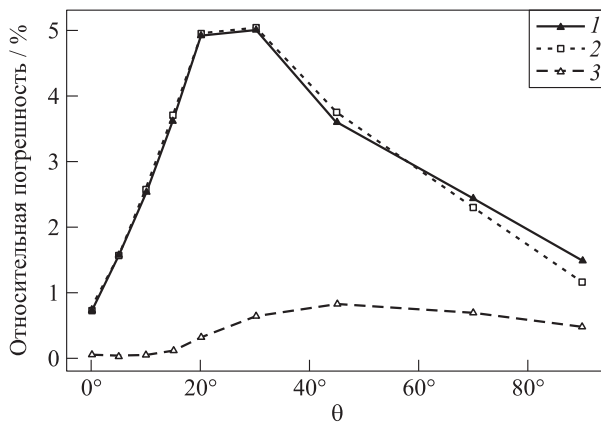


Рис. 3 Погрешность измерения модуля упругости $E_x^\#$: 1 — вычисленного по соотношениям (1), (2) и (4) относительно экспериментального значения; 2 — вычисленного в АСР относительно экспериментального значения; 3 — вычисленного по соотношениям (1), (2) и (3) относительно вычисленного в АСР

$G_{12} = 6$ ГПа; $\nu_{12} = 0,3$. Видно, что результаты численных экспериментов, полученные в модуле АСР и при использовании соотношений (1), (2) и (4), хорошо согласуются.

На эффективные упруго-жесткостные свойства многослойного материала существенное влияние оказывает ориентация армирующих слоев относительно друг друга. На рис. 5 представлены результаты расчета модуля упругости для

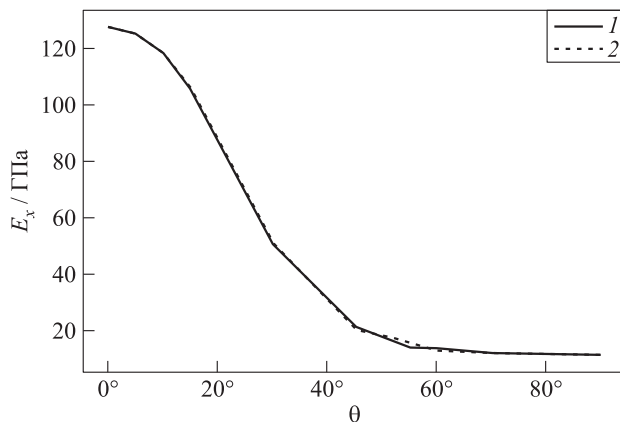


Рис. 4 Модули упругости перекрестно армированного композиционного материала AS4/3502: 1 — вычисленного по соотношениям (1), (2) и (4); 2 — вычисленного в АСР

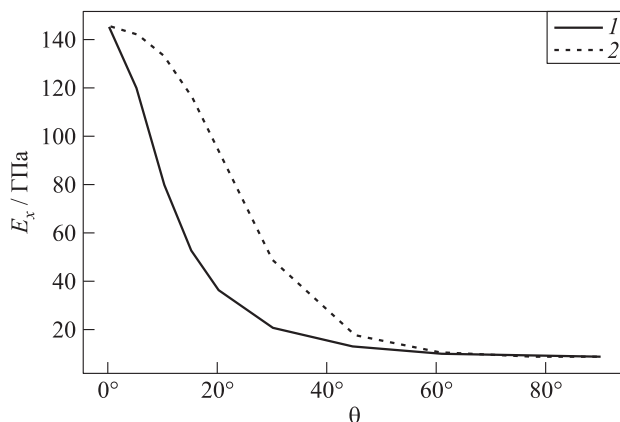


Рис. 5 Зависимость модулей упругости от угла армирования θ : 1 — модуль упругости материала из одинаково ориентированных слоев под углом θ к оси растяжения; 2 — модуль упругости перекрестно армированного материала

двух образцов композиционного материала, слои которого состоят из материала марки IM7/8551-7a. Кривая 1 иллюстрирует результаты расчета E_x'' при укладке слоев без изменения угла армирования и растяжении материала под углом θ к направлению армирования. Кривая 2 — модуль упругости $E_x^\#$ для многослойного материала со структурой армирования $[\pm\theta]$. Видно, что выбор ориентации при укладке слоев может значительно влиять на модуль упругости многослойного композиционного материала. Для рассмотренного случая модули упругости E_x'' и $E_x^\#$ могут отличаться на 50%.

4 Заключение

В работе показано, что для расчета эффективных упругих характеристик многослойного композиционного материала с разноориентированной структурой армирования слоев оправдано использование подхода, в основе которого лежит вычисление коэффициентов матрицы жесткости многослойного материала. При этом допущения о квазиоднородности трансверсально изотропных монослоев и их идеальном соединении не влияют на степень согласия расчетных и экспериментальных данных — относительное отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 5%. Учитывая актуальность задач проектирования композиционных материалов с заданными свойствами, анализ, апробация и верификация моделей, позволяющих рассчитывать эффективные упругие свойства композиционного материала, должны стать одними из ключевых этапов построения программного комплекса, позволяющего решать обратную задачу — проектирование новых композиционных материалов с заданными макроскопическими характеристиками.

Литература

1. *Kwon Y. W., Allen D. H., Talreja R.* Multiscale modeling and simulation of composite materials and structures. — Springer, 2008. 625 p.
2. *Rana S., Parveen S., Figueiro R.* Multiscale composites for aerospace engineering // Advanced composite materials for aerospace engineering. — Elsevier, 2016. P. 265–293. doi: B9780081000373000092.
3. *Chatzigeorgiou G., Meraghni F., Charalambakis N.* Multiscale modeling approaches for composites. — Elsevier, 2022. 364 p.
4. *Абгарян К. К., Гаврилов Е. С.* Программный комплекс для многомасштабного моделирования структурных свойств композиционных материалов // Информатика и её применения, 2022. Т. 16. Вып. 1. С. 88–97. doi: 10.14357/19922264220113.
5. *Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Г. Б.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
6. *Peel L. D., Hyer W. M., Shuart M. J.* Compression failure of angle-ply laminates. — Blacksburg, VA, USA: College of Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1991. Interim Report 87. 162 p.
7. *Finckenor J. L.* Determination of significant composite processing factors by designed experiment. — Huntsville, AL, USA: NASA Marshall Space Flight Center, 2003. MSFS Center Director's Discretionary Fund Final Report, Project No. 95-23. 68 p. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20030068919/downloads/20030068919.pdf>.
8. *Barbero E. J.* Introduction to composite materials design. — Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2011. 508 p.

Поступила в редакцию 15.09.23

METHOD FOR COMPUTER MODELING OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF MULTILAYER COMPOSITE MATERIALS

K. K. Abgaryan, N. L. Zagordan, and Y. D. Mochalova

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

Abstract: Modern polymer composite materials are widely used in the aerospace industry. Creation of new materials with the required characteristics is one of the most important directions for the development of the industry, especially in connection with the need to quickly resolve the issues related to import substitution. The paper presents the results of calculation of the effective elastic characteristics of multilayer polymer composite materials with differently oriented layer reinforcement structure. The model of reinforced material based on the assumption that the composite material consists of quasi-homogeneous transversally isotropic perfectly connected layers is used. The obtained calculation results are in good agreement with both experimental data and the results of calculations of commercial packages and can be used to automate scientific and engineering calculations in the selection of components and methodology of their placement according to the given characteristics of polymer composite materials.

Keywords: computer modeling; multilayer polymer composites; elastic characteristics

DOI: 10.14357/08696527230409

EDN: DPZJSX

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. Kwon, Y. W., D. H. Allen, and R. Talreja. 2008. *Multiscale modeling and simulation of composite materials and structures*. Springer. 625 p.
2. Rana, S., S. Parveen, and R. Figueiro. 2016. Multiscale composites for aerospace engineering. *Advanced composite materials for aerospace engineering*. Elsevier. 265–293. doi: B9780081000373000092.
3. Chatzigeorgiou, G., F. Meraghni, and N. Charalambakis. 2022. *Multiscale modeling approaches for composites*. Elsevier. 364 p.
4. Abgaryan, K. K., and E. S. Gavrilov. 2022. Programmnyy kompleks dlya mnogomasshtabnogo modelirovaniya strukturnykh svoystv kompozitsionnykh materialov [Software package for multiscale modeling of structural properties of composite materials]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 16(1):88–97. doi: 10.14357/19922264220113.

5. Alfutov, N. A., P. A. Zinov'ev, and G. B. Popov. 1984. *Raschet mnogosloynnykh platin i obolochek iz kompozitsionnykh materialov* [Calculation of multilayer plates and shells made of composite materials]. Moscow: Mashinostroenie. 264 p.
6. Peel, L. D., W. M. Hyer, and M. J. Shuart. 1991. Compression failure of angle-ply laminates. Blacksburg, VA: College of Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University. Interim Report 87. 162 p.
7. Finckenor, J. L. 2003. Determination of significant composite processing factors by designed experiment. Huntsville, AL: NASA Marshall Space Flight Center. MSFS Center Director's Discretionary Fund Final Report, Project No. 95-23. 68 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20030068919/downloads/20030068919.pdf> (accessed October 23, 2023).
8. Barbero, E. J. 2011. *Introduction to composite materials design*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. 508 p.

Received September 15, 2023

Contributors

Abgaryan Karine K. (b. 1963) — Doctor of Science in physics and mathematics, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; kristal83@mail.ru

Zagordan Nadezhda L. (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; zagordann@gmail.com

Mochalova Yulia D. (b. 1996) — mathematician, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; juliamochalova96@gmail.com

ПОИСК С ИСКЛЮЧЕНИЕМ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕКСТАХ*

А. А. Гончаров¹

Аннотация: Статья посвящена рассмотрению метода поиска с исключением в параллельных текстах. Основой для разработки описываемого метода стал подход к тексту как к упорядоченному множеству словоформ. В рамках этого подхода рассмотрены возможности поиска на двух языках по точной форме, по лемме и по морфологическим признакам. Показано, что этот подход дает основу не только для перечисленных видов поиска, но и для поиска с исключением, позволяющего находить в параллельных текстах такие пары фрагментов, которые содержат какие-либо словоформы на языке А, но не содержат ни одной словоформы из заданного множества на языке Б. В качестве иллюстрации приводится пример поиска фрагментов с имплицитными логико-семантическими отношениями в параллельных текстах, хранимых в базе данных. Так, если искомая словоформа на языке А является показателем некоторого логико-семантического отношения, а множество словоформ на языке Б содержит максимально полный список вариантов перевода искомой словоформы на язык Б, при поиске можно получить пары фрагментов, где во фрагменте на языке А логико-семантическое отношение выражено искомой словоформой, а во фрагменте на языке Б оно имплицитное.

Ключевые слова: поиск на двух языках; поиск с исключением; имплицитность; извлечение знания из текстов; параллельные тексты; логико-семантические отношения

DOI: 10.14357/08696527230410

EDN: CVPFDV

1 Введение

Параллельный текст — текст на одном языке, которому сопоставлен его перевод на другой язык, — представляет собой ценный источник знания о каждом из этих языков, в том числе такого, которое невозможно получить при работе с моноязычными текстами². Йорг Тидеманн — один из крупных специалистов, занимающихся проблемами параллельных текстов, — отмечает, что параллельные тексты **в неявном виде содержат множество лингвистических знаний** (*rich linguistic knowledge implicitly stored in parallel resources*), значимых для развития целого ряда направлений, к которым он относит машинный перевод, двуязычную

*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

²По этой теме см., например, работы, упомянутые в разд. 2 статьи [1].

и моноязычную лексикографию, снятие омонимии, извлечение терминов и др. [2, с. IX, 5–6].

Процесс установления связей между соответствующими друг другу по содержанию фрагментами оригинала и перевода называется выравниванием текстов. Чаще всего выравнивание осуществляется: (1) на уровне предложений и (2) для двух текстов на разных языках¹, т. е. в идеальном случае результатом такого выравнивания становится последовательность пар фрагментов, первый из которых включает одно предложение оригинала, а второй — одно предложение перевода². Далее в статье под словосочетанием *параллельный текст* будет пониматься именно выровненный по предложениям двуязычный текст (ср. англ. *bitext*, сокр. от *bilingual text*).

Одно из ключевых преимуществ работы с параллельными текстами — возможность вести **поиск на двух языках**: как поиск точных форм, так и лексико-грамматический поиск. Цель статьи состоит в описании еще одного вида поиска на двух языках — поиска с исключением. В то время как поиск точных форм и лексико-грамматический поиск можно использовать и при работе с моноязычными текстами, поиск с исключением в том виде, как он представлен в статье, может проводиться только в параллельных текстах. В качестве иллюстрации используется поиск пар фрагментов, где фрагмент на одном из языков с высокой вероятностью содержит имплицитное логико-семантическое отношение. Поиск проводится по текстам, загруженным в надкорпусную базу данных (НБД), созданную в ФИЦ ИУ РАН [3, 4].

2 Текст как упорядоченное множество

Для удобства описания предлагаемого метода поиска рассмотрим параллельный текст в теоретико-множественном ключе.

Каждый фрагмент текста можно представить как упорядоченное множество словоформ:

$$F = \langle w_1, \dots, w_n \rangle.$$

В качестве иллюстрации рассмотрим предложение из примера 1.

Пример 1. Теперь уже никаких документов не смотрели, годы рождения не играли роли [А. В. Кузнецов. Бабий Яр (1966)].

¹Следует отметить, что целый ряд параметров выравнивания могут варьироваться: (1) единица выравнивания (степень детализации) — так помимо выравнивания по предложениям предпринимаются попытки пословного выравнивания и выравнивания деревьев синтаксических составляющих; (2) число переводов, соответствующих какому-либо оригиналу; (3) число языков, на которые выполнены переводы (см. подробнее соответствующие разделы и главы в [2]).

²Однако текст перевода не всегда разделен на предложения так же, как текст оригинала: при переводе предложения могут объединяться, разделяться, удаляться, добавляться и переставляться.

Упорядоченное множество F , включающее с учетом порядка следования все словоформы, использованные в этом фрагменте, содержит 11 элементов:

$$F = \langle \text{Теперь, уже, никаких, документов, не, смотрели,} \\ \text{годы, рождения, не, играли, роли} \rangle.$$

При этом множество F' (неупорядоченное), включающее все словоформы, использованные в этом фрагменте, содержит 10 элементов, так как дважды повторяется элемент *не*:

$$F' = \{ \text{Теперь, уже, никаких, документов, не, смотрели,} \\ \text{годы, рождения, играли, роли} \}.$$

Каждая пара фрагментов — тоже упорядоченное множество, элементами которого служат множества, соответствующие фрагменту оригинала и фрагменту перевода. В соответствии с терминами, используемыми в переводоведении, для обозначения сущностей, относящихся к тексту оригинала, будем применять индекс «src» (от англ. *source* — исходный текст), а для тех, что относятся к тексту перевода, — «trg» (от англ. *target* — целевой текст):

$$P = \langle F_{\text{src}}, F_{\text{trg}} \rangle.$$

Следовательно, и сам параллельный текст также является упорядоченным множеством, элементы которого представляют собой множества, соответствующие парам:

$$T = \langle P_1, \dots, P_m \rangle.$$


3 Виды поиска на двух языках

При таком рассмотрении становится очевиден спектр возможностей поиска пар фрагментов по различным параметрам, основанный на операциях над множествами словоформ.

Во-первых, это *поиск по точным формам*, который в случае работы с параллельным текстом может позволить находить пары, где фрагмент оригинала и/или фрагмент перевода содержит некоторое множество словоформ, которые указываются напрямую. Эти множества обозначим как W_{src} и W_{trg} соответственно. Критерии могут как задаваться для оригинала и перевода по отдельности, так и сочетаться друг с другом. В табл. 1 перечислены возможные виды поиска по точным формам. Каждому виду поиска присвоено краткое обозначение, где «E» — от англ. *exact*, а «s» и «t» — от англ. *source* и *target* соответственно.

Во-вторых, при условии, что для каждой словоформы указана ее лемма (словарная форма) и набор морфологических признаков, которые описывают

Таблица 1 Возможные виды поиска пар по точным формам в параллельном тексте

Код	Фрагмент оригинала содержит	Связь	Код	Фрагмент перевода содержит
1E-s	множество словоформ W_{src} , где $W_{src} = \{w_{x_i}\}$		1E-t	множество словоформ W_{trg} , где $W_{trg} = \{w_{y_i}\}$
2E-s	любую словоформу из множества W_{src} , где $W_{src} = \{w_{x_1}, \dots, w_{x_i}\}$		2E-t	любую словоформу из множества W_{trg} , где $W_{trg} = \{w_{y_1}, \dots, w_{y_j}\}$
3E-s	каждую словоформу из множества W_{src} , где $W_{src} = \{w_{x_1}, \dots, w_{x_i}\}$		3E-t	каждую словоформу из множества W_{trg} , где $W_{trg} = \{w_{y_1}, \dots, w_{y_j}\}$

эту словоформу (часть речи, род, число, падеж и т. д.), становится возможным **лексико-грамматический поиск**: по лемме и по морфологическим признакам.

Поиск по лемме в случае работы с параллельным текстом может позволить находить пары, где фрагмент оригинала и/или фрагмент перевода содержит некоторое множество словоформ, которые относятся к какой-либо лемме. Эти множества обозначим соответственно как W_{src}^l и W_{trg}^l (индекс «l» от англ. *lemma*). Критерии могут как задаваться для оригинала и перевода по отдельности, так и сочетаться друг с другом. В табл. 2 перечислены возможные виды поиска по лемме, где по аналогии с табл. 1 каждому из видов присвоено обозначение, но вместо «E» указано «L» (от англ. *lemma*)

В табл. 3 приводятся примеры пар фрагментов параллельного текста, а в табл. 4 — соответствия между примерами поисковых запросов, иллюстрирующих основные схемы, перечисленные в табл. 1 и 2, и парами из табл. 3,

Таблица 2 Возможные виды поиска пар по лемме в параллельном тексте

Количество лемм	Код	Фрагмент оригинала содержит	Связь	Код	Фрагмент перевода содержит
Одна	1L-s	одну или несколько словоформ $w_x \in W_{src_1}^l$		1L-t	одну или несколько словоформ $w_y \in W_{trg_1}^l$
Две и более	2L-s	одну или несколько словоформ $w_x^1 \in W_{src_1}^l$ ИЛИ одну или несколько словоформ $w_x^2 \in W_{src_2}^l$ и т. д.		2L-t	одну или несколько словоформ $w_y^1 \in W_{trg_1}^l$ ИЛИ одну или несколько словоформ $w_y^2 \in W_{trg_2}^l$ и т. д.
	3L-s	одну или несколько словоформ $w_x^1 \in W_{src_1}^l$ И одну или несколько словоформ $w_x^2 \in W_{src_2}^l$ и т. д.		3L-t	одну или несколько словоформ $w_y^1 \in W_{trg_1}^l$ И одну или несколько словоформ $w_y^2 \in W_{trg_2}^l$ и т. д.

Таблица 3 Примеры пар фрагментов параллельного текста

№	Фрагмент оригинала	Фрагмент перевода
1	Должен сказать, что Юра любил драться. [Ф. А. Искандер. Мой кумир (1965)]	I must admit that Yura liked a fight. [My idol (пер. R. Daglish, K. M. Cook-Horuju, 1972–1989)]
2	— Мы еще должны найти доктора и пистолеты, — сказал Гнушке. [В. В. Набоков. Подлец (1927)]	“We must still find a doctor and the pistols,” said Gnushke. [An affair of honor (пер. D. Nabokov <i>et al.</i> , 1966)]
3	Ему вон, бойцу-то, весь мир должен в ножки кланяться, а вы — «пятишься»! [Б. Н. Полевой. Повесть о настоящем человеке (1946)]	The whole world ought to go down on its knees to that boy! And you say “back away.” [A story about a real man (пер. J. Fineberg, 1950)]
4	Но план свой я обязан выполнить. [В. В. Набоков. Изобретение Вальса (1927)]	However, I must carry out my plan. [The Waltz invention (пер. V. Nabokov, 1965)]
5	Все население обязано сдать излишки продовольствия. [А. В. Кузнецов. Бабий Яр (1966)]	The whole population must hand over all surplus food. [Babi Yar (пер. D. Floyd, 1970)]
6	В случае вашего отказа в моих просьбах я вынужден буду незамедлительно уйти из института. [В. С. Гроссман. Жизнь и судьба (1950–1959)]	If my requests are denied, I shall be compelled to resign from the Institute immediately. [Life and fate (пер. R. Chandler, 1985)]
7	Да-с, умный человек девятнадцатого столетия должен и нравственно обязан быть существом по преимуществу бесхарактерным; человек же с характером, деятель, — существом по преимуществу ограниченным. [Ф. М. Достоевский. Записки из подполья (1864)]	Yes, a man in the nineteenth century must and morally ought to be pre-eminently a characterless creature; a man of character, an active man is pre-eminently a limited creature. [Notes from the underground (пер. A. R. MacAndrew, 1961)]
8	[...] в этой области мы, если хотим быть гуманными, христианами наконец, мы должны и обязаны проводить убеждения, лишь оправданные рассудком и опытом, проведенные чрез горнило анализа [...]. [Ф. М. Достоевский. Братья Карамазовы (1878–1880)]	[...] in that sphere, if we want to be humane — Christian, in fact — we must , or ought to, act only upon convictions justified by reason and experience, which have been passed through the crucible of analysis [...]. [The Brothers Karamazov (пер. C. Garnett, 1912)]

которые могли бы попасть в поисковую выдачу при использовании этих запросов. В примерах запросов символ «|» обозначает логическое ИЛИ, символ «&» — логическое И. Леммы заключены в фигурные скобки, т. е. запись «{должный}» обозначает множество всех форм слова *должный*.

Таблица 4 Соответствия между примерами поисковых запросов и пар фрагментов параллельного текста

Код	Пример запроса к оригиналу	Код	Пример запроса к переводу	№ примера из табл. 3								
				1	2	3	4	5	6	7	8	
1E-s	<i>должен</i>	1E-t	<i>must</i>	+							+	
2E-s	<i>должен обязан вынужден</i>	2E-t	<i>must ought should</i>	+		+	+				+	
3E-s	<i>должен & обязан</i>	3E-t	<i>must & ought</i>								+	
1L-s	{ <i>должный</i> }	1L-t	<i>must</i>	+	+						+	+
2L-s	{ <i>должный</i> } { <i>обязанный</i> } { <i>вынужденный</i> }	2L-t	{ <i>must</i> } { <i>ought</i> } { <i>shall</i> }	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3L-s	{ <i>должный</i> } & { <i>обязанный</i> }	3L-t	{ <i>must</i> } & { <i>ought</i> }								+	+

Поиск по морфологическим признакам в случае работы с параллельным текстом может позволить находить пары, где фрагмент оригинала и/или фрагмент перевода содержит некоторое множество словоформ, которые имеют заданный набор морфологических признаков. На практике, как правило, возникают задачи поиска фрагментов с одной или несколькими словоформами $w_x \in W_{src}^m$ в оригинале и/или одной или несколькими словоформами $w_y \in W_{trg}^m$ (индекс « m » от англ. *morphology*), но теоретически этот вид поиска может предоставить такие же возможности, как и поиск по лемме (т.е. могут быть заданы два и более набора морфологических признаков). Распространено сочетание поиска по морфологическим признакам и по лемме или точной форме.

Кроме того, поскольку фрагменты были представлены как **упорядоченные** множества, каждая из опций поиска может быть применена не только для работы с отдельными словоформами, но и с упорядоченными множествами словоформ. Эта возможность особенно важна для поиска неоднословных единиц, среди которых много единиц, выражающих логико-семантические отношения между фрагментами текста: *потому что, так как, так что, а то, а также, тем не менее* и проч.

Впрочем, сколь бы широкими ни были описанные выше возможности, все они предполагают поиск таких пар, где фрагмент оригинала и/или фрагмент перевода включают некоторый заданный набор элементов. Иными словами, такие пары фрагментов могут проиллюстрировать некоторое **заранее заданное межъязыковое соответствие** вида «словоформа $w_x \in W_1$ соответствует словоформе $w_y \in W_2$ ».

Но такое теоретико-множественное рассмотрение пар фрагментов и самих этих фрагментов закономерно приводит к мысли о возможности поиска таких пар, где один из фрагментов (F_1) содержит какие-либо словоформы $w_x \in W_1$, а другой фрагмент (F_2) не содержит ни одной словоформы $w_y \in W_2$. Иными словами, такие пары фрагментов могут проиллюстрировать некоторое **неизвестное межъязыковое соответствие** вида «словоформа $w_x \in W_1$ соответствует словоформе $w_z \notin W_2$ » или «словоформа $w_x \in W_1$ не имеет соответствия в дру-

гом языке». Назовем такой вид поиска **поиск с исключением в параллельных текстах**.

Если же задать множество словоформ $W_1 = \{w_x\}$ и такое множество $W_2 = \{w_{y_1}, \dots, w_{y_j}\}$, которое будет включать все известные варианты перевода словоформы w_x , то удастся найти такие пары, где семантика словоформы w_x либо изменена (словоформе w_x соответствуют языковые единицы, имеющие другую семантику), либо утеряна, либо осталась имплицитной. Наибольший интерес представляют пары, относящиеся к третьей группе¹.

Например, если в русско-английском параллельном тексте романа А. В. Кузнецова «Бабий яр» (пер. D. Floyd) произвести поиск таких пар, где фрагмент перевода F_{trg} содержит множество словоформ W_{trg} , где $W_{trg} = \{\text{because}\}$, а фрагмент оригинала F_{src} не содержит ни одной словоформы из множества W_{src} , где $W_{src} = \{\text{потому, оттого, ибо, поскольку, ведь}\}$, то будет найдена, в частности, пара фрагментов, приведенная в примере 2.

Пример 2. Теперь уже никаких документов не смотрели, годы рождения не играли роли [А. В. Кузнецов. Бабий Яр (1966)]. The Germans no longer asked for any documents, **because** dates of birth were of no importance [Babi Yar (пер. D. Floyd, 1970)].

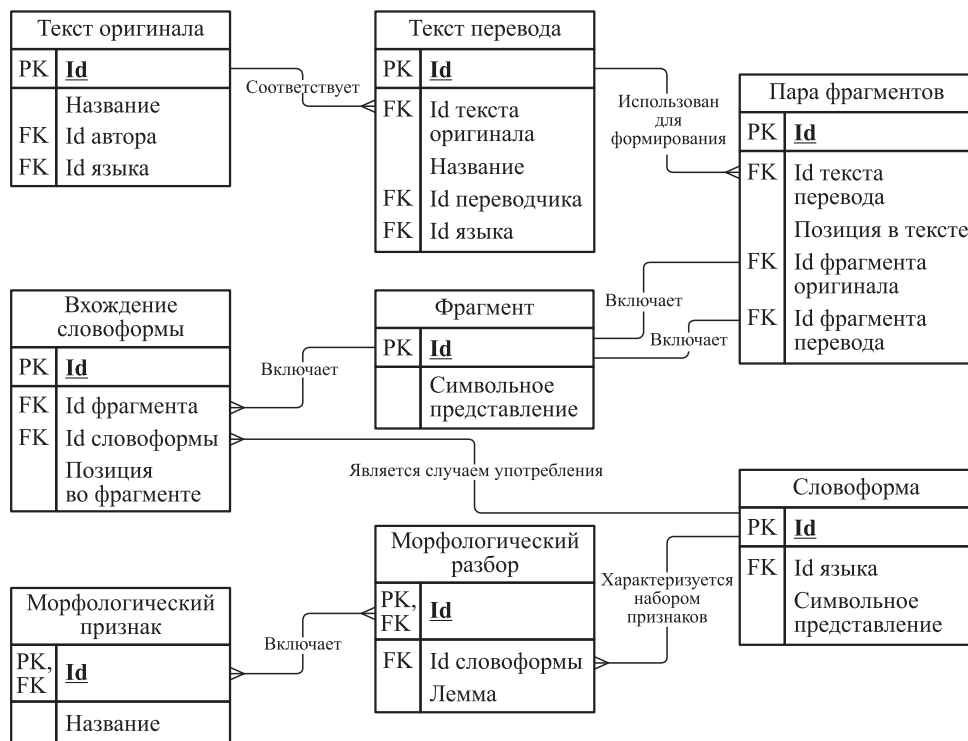
В примере 2 логико-семантическое отношение причины между *The Germans no longer asked for any documents* и *dates of birth were of no importance* в переводе выражено при помощи *because*, а в оригинале оно оказывается имплицитным (ничем не выражено).

4 Использование надкорпусной базы данных для поиска с исключением в параллельных текстах

Как было показано в [1, 8], возможности автоматизации поиска таких примеров появляются лишь при наличии параллельных текстов. Если же говорить о возможностях поиска, основанного на вышеописанных принципах рассмотрения фрагментов текста как упорядоченных множеств, то такой поиск можно проводить, используя НБД.

В работе [4] отмечается, что НБД включает две составляющих: корпусную, предназначенную для хранения текстов, и собственно надкорпусную, предназначенную для хранения структурированных описаний переводных соответствий, которые содержат вхождения каких-либо языковых единиц, найденных в этих текстах. В рамках настоящей статьи остановимся подробнее на корпусной части, так как именно ее устройство должно обеспечивать описанные в разд. 3 возможности поиска пар.

¹Некоторые эксперименты по использованию поиска с исключением в параллельных текстах описаны в работах [5-7].



Фрагмент логической схемы корпусной составляющей НБД: PK — primary key; FK — foreign key

На рисунке изображен фрагмент логической схемы корпусной составляющей НБД. На нем в упрощенном виде представлены таблицы базы данных, играющие ключевую роль в поиске пар.

Таблицы «Текст оригинала» и «Текст перевода» содержат сведения о текстах, использованных для создания параллельного текста (т. е. метаданные). Таблица «Текст перевода» связана с таблицей «Пара фрагментов», где указана позиция пары в тексте и идентификаторы фрагментов оригинала и перевода. Сами же тексты фрагментов хранятся в таблице «Фрагмент». Таблицы «Фрагмент» и «Словоформа» связаны через таблицу «Вхождение словоформы», где помимо собственно связей содержатся данные о линейном порядке вхождений словоформ внутри фрагмента. Таблица «Словоформа» связана с таблицей «Морфологический разбор» — одной словоформе может соответствовать несколько таких разборов (наборов морфологических признаков), а сведения о самих признаках хранятся в таблице «Морфологический признак». Связь многие-ко-многим между двумя последними таблицами реализована за счет промежуточной таблицы

связей, которой на рисунке нет. Такая структура базы данных делает возможным использование всех видов поиска, перечисленных в разд. 3.

Чтобы автоматизировать формирование SQL-запросов для поиска с исключением в параллельных текстах, был разработан соответствующий пользовательский интерфейс. Он позволяет вводить в текстовое поле строку специального формата, которая программно анализируется и, если формат не нарушен, составляется запрос к базе данных. На момент написания статьи разработан функционал, позволяющий исключить из поисковой выдачи пары, где какой-либо из фрагментов содержит:

- (1) одиночную словоформу;
- (2) последовательность словоформ;
- (3) слово во всех формах;
- (4) последовательность слов во всех формах.

Эти возможности можно комбинировать для составления сложных условий, а независимые друг от друга условия перечислять в рамках одной строки. Примеры поисковых строк приводятся в табл. 5.

Строка теоретически может содержать неограниченное число таких условий, перечисляемых через точку с запятой.

Автору не удалось найти упоминаний о подобных функциях поиска на двух языках, реализованных в каких-либо корпусах. Функционал, отвечающий за

Таблица 5 Примеры поисковых строк для исключения фрагментов с заданными характеристиками

Пример	Описание
-поскольку	Фрагмент не должен содержать словоформу <i>поскольку</i>
-потому (0, 3) что	Фрагмент не должен содержать последовательности словоформ <i>потому</i> и <i>что</i> , между которыми могут находиться от 0 до 3 других слов
-{причина}	Фрагмент не должен содержать слова <i>причина</i> во всех формах
-{причина} (0, 2) быть	Фрагмент не должен содержать слова <i>причина</i> во всех формах и слова <i>быть</i> во всех формах, между которыми могут находиться от 0 до 2 других слов
-{причина} (0, 2) было	Фрагмент не должен содержать слова <i>причина</i> во всех формах и словоформы <i>было</i> , между которыми могут находиться от 0 до 2 других слов
-поскольку; ибо	Фрагмент не должен содержать словоформы <i>поскольку</i> или <i>ибо</i>
-поскольку; ибо; так (0, 0) как; потому (0, 3) что; {причина}	Фрагмент не должен содержать: словоформу <i>поскольку</i> ; словоформу <i>ибо</i> ; последовательность словоформ <i>так</i> и <i>как</i> , между которыми нет ни одного слова; последовательность словоформ <i>потому</i> и <i>что</i> , между которыми может быть от 0 до 3 слов; слово <i>причина</i> во всех формах

исключение каких-либо словоформ, привязан не к фрагменту текста (как это описано в настоящей статье), а к конкретному вхождению словоформы. Так, в новой версии Национального корпуса русского языка имеется возможность исключать «мешающие» словоформы: например, можно найти глагол *прочить* во всех формах, исключая при этом словоформу *прочь* [9]. Подобные запросы можно составлять и с использованием языка CQL — Corpus Query Language [10], однако возможности, описанные в настоящей статье, ни там ни там недоступны.

5 Заключение

В статье было показано, что подход к тексту как к упорядоченному множеству обеспечивает широкие возможности для формирования поисковых запросов при работе с параллельными текстами. Некоторые из них доступны и в морфологически размеченных моноязычных корпусах — поиск по точной форме, по лемме и по морфологическим признакам, но в параллельных корпусах возможности поиска расширяются не только за счет большего числа комбинаций, но и за счет того, что текст на одном языке позволяет накладывать дополнительные ограничения на то, каким должен быть текст на другом языке.

Упомянутое в статье обнаружение фрагментов с имплицитными логико-семантическими отношениями — лишь одна из сфер применения такого поиска. В частности, он также может использоваться для выявления таких вариантов перевода исследуемых языковых единиц, которые не зафиксированы в двуязычных словарях и других лексикографических ресурсах, а также для поиска языковых единиц, варианты перевода которых отличаются высокой степенью разнообразия и потому представляют сложности для перевода, в том числе машинного.

Литература

1. Гончаров А. А. Методы поиска имплицитных логико-семантических отношений в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 4. С. 32–44. doi: 10.14357/08696527220404.
2. Tiedemann J. Bitext alignment. — Morgan & Claypool Pubs., 2011. 165 p.
3. 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.
4. 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.
5. Гончаров А. А., Инькова О. Ю. Методика поиска имплицитных логико-семантических отношений в тексте // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 3. С. 97–104. doi: 10.14357/19922264190314. EDN: MWGFJW.
6. Гончаров А. А., Инькова О. Ю. Имплицитные логико-семантические отношения и метод их поиска в параллельных текстах // Компьютерная лингвистика и интел-

- лектуальные технологии: По мат-лам ежегодной Междунар. конф. «Диалог». — М.: РГГУ, 2020. Вып. 19(26). С. 310–320. EDN: DBWWEY.
7. *Гончаров А. А.* Взаимодействие логико-семантического отношения причины с другими отношениями: опыт описания на основе контрастивного анализа показателей // Причинные конструкции в языках мира (синхрония, диахрония, типология): Мат-лы Междунар. конф. / Сост. Н. М. Заика. — СПб.: ИЛИ РАН, 2020. С. 84–87. EDN: MXJJSU.
 8. *Гончаров А. А.* Методы поиска имплицитных логико-семантических отношений в монологичных текстах // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 3. С. 92–102. doi: 10.14357/08696527220309. EDN: NUVZGN.
 9. Национальный корпус русского языка. Поиск с помощью операторов. <https://ruscorpora.ru/page/manual-lemmasearch-advanced>.
 10. Cambridge sketch engine. Using Corpus Query Language (CQL). <https://www.cambridge.org/sketch/help/userguides/CQL%20Help%201.3.pdf>.

Поступила в редакцию 15.09.23

SEARCH WITH EXCLUSION IN PARALLEL TEXTS

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 examines the method of search with exclusion in parallel texts. The described method is based on the approach that takes a text as an ordered set of wordforms. In the context of this approach, the possibilities of bilingual search by exact form, by lemma, and by morphological features are considered. This approach provides a basis not only for the abovementioned types of search, but also for search with exclusion, i. e., a search allowing to find in parallel texts such pairs of text fragments that contain a certain wordform in language A but do not contain any wordform from a given set in language B. To illustrate this idea, an example of searching fragments with implicit logical-semantic relations in parallel texts stored in a database is given. If the required wordform in language A marks a logical-semantic relation and the set of wordforms in language B contains the maximum number of variants for the translation of the required wordform into language B, the search can yield the pairs of fragments where the logical-semantic relation is expressed in the fragment in language A by the required wordform but it is implicit in the fragment in language B.

Keywords: bilingual search; search with exclusion; implicitness; knowledge extraction from texts; parallel texts; logical-semantic relations

DOI: 10.14357/08696527230410

EDN: CVPFDV

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. Goncharov, A. A. 2022. Metody poiska implitsitnykh logiko-semanticheskikh otnosheniy v parallel'nykh tekstakh [Methods for retrieval of implicit logical-semantic relations from parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(4):32–44. doi: 10.14357/08696527220404.
2. Tiedemann, J. 2011. *Bitext alignment*. Morgan & Claypool Publ. 165 p.
3. Zatsman, I., M. Kruzhkov, and E. Loshchilova. 2019. Metody i sredstva informatiki dlya opisaniya struktury neodnoslovnnykh 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. Inkova. Moscow: TORUS PRESS. 205–230. doi: 10.30826/SEMANTICS19-06. EDN: YVAJWN.
4. Kruzhkov, M. 2021. Kontsepsiya postroeniya nadkorpussykh 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.
5. Goncharov, A. A., and O. Yu. Inkova. 2019. Metodika poiska implitsitnykh logiko-semanticheskikh otnosheniy v tekste [Methods for identification of implicit logical-semantic relations in texts]. *Informatika i ee Primeniya — Inform. Appl.* 13(3):97–104. doi: 10.14357/19922264190314. EDN: MWGFJW.
6. Goncharov, A. A., and O. Yu. Inkova. 2020. Implitsitnye logiko-semanticheskie otnosheniya i metod ikh poiska v parallel'nykh tekstakh [Implicit logical-semantic relations and a method of their identification in parallel texts]. *Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nye tekhnologii: Po mat-lam ezhegodnoy Mezhdunar. konf. “Dialog”* [Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Papers from the Annual Conference (International) “Dialogue”]. Moscow: RSHI. 19(26):310–320. EDN: DBWWEY.
7. Goncharov, A. A. 2020. Vzaimodeystvie logiko-semanticheskogo otnosheniya prichiny s drugimi otnosheniyami: opyt opisaniya na osnove kontrastivnogo analiza pokazateley [Interaction of the causal logical-semantic relation with other relations: An attempt of description based on the contrastive analysis of markers]. *Mat-ly Mezhdunar. konf. “Prichinnye konstruksii v yazykakh mira (sinkhroniya, diakhroniya, tipologiya)”* [Conference (International) “Causal Constructions in the World’s Languages (Synchrony, Diachrony, Typology)” Proceedings]. St.Petersburg: ILI RAS. 84–87. EDN: MXJJSU.
8. Goncharov, A. A. 2022. Metody poiska implitsitnykh logiko-semanticheskikh otnosheniy v monoyazychnnykh tekstakh [Methods for retrieval of implicit logical-semantic relations from monolingual texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(3):92–102. doi: 10.14357/08696527220309. EDN: NUVZGN.

9. Poisk s pomoshch'yu operatorov [Search with operators]. *Natsional'nyy korpus russkogo yazyka* [The Russian National Corpus]. Available at: <https://ruscorpora.ru/en/page/manual-lemmasearch-advanced/> (accessed October 26, 2023).
10. Cambridge sketch engine. Using Corpus Query Language (CQL). Available at: <https://www.cambridge.org/sketch/help/userguides/CQL%20Help%201.3.pdf> (accessed October 26, 2023).

Received September 15, 2023

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

ГРАФОВЫЕ n -ГРАММЫ В ЗАДАЧЕ АТРИБУЦИИ ТЕКСТОВ

Н. Д. Москин¹, А. А. Рогов², А. А. Лебедев³

Аннотация: Представлены результаты исследований в области моделирования структуры текстов с использованием обобщенной контекстно-зависимой теоретико-графовой модели. Объектом исследования стали в основном литературные и фольклорные тексты, для которых возникает задача атрибуции. Например, таких текстов много в творчестве известного русского писателя Ф. М. Достоевского. Авторы показывают, как можно построить гибридные модели, основанные на деревьях зависимостей, графовых моделях синтаксической структуры связей между простыми предложениями в составе многокомпонентного сложного предложения и графов «сильных связей» сочетаемости слов различных грамматических классов. Такие модели позволяют конструировать новые информативные признаки, потенциально применимые в атрибуции текстов. Примером служит частота встречаемости графовых n -грамм, которые представляют собой обобщение обычных n -грамм, синтаксических n -грамм и других подобных конструкций, применяемых в стилистических исследованиях.

Ключевые слова: искусственный интеллект; атрибуция текстов; граф; метаграф; гибридный граф; фольклорный текст; литературный текст; графовая n -грамма

DOI: 10.14357/08696527230411

EDN: ANMCWV

1 Введение

В настоящее время анализ текстовой информации количественными методами особенно актуален, поскольку с его помощью можно решать большое число задач разного рода, начиная от частных (среди которых машинный перевод, реферирование, плагиат, атрибуция, выделение неоднородных фрагментов в тексте, классификация текстов и т. д.), заканчивая глобальной — пониманием текста. В отечественной лингвистике подобного рода исследования, проводимые на стыке филологии и математики, имеют давнюю историю [1].

Сегодня существует большое число различных способов, позволяющих решать вышеуказанные частные задачи. Наиболее популярны нейросетевые методы. Анализируя большой объем информации, данные методы позволяют выявить статистические закономерности и в зависимости от цели задачи описать их или найти выбросы (отклонения от общих закономерностей). Возникло новое направление анализа текстов — автоматическая обработка текстов (АОТ), сочетающая

¹Петрозаводский государственный университет, moskin@petsu.ru

²Петрозаводский государственный университет, rogov@petsu.ru

³Петрозаводский государственный университет, perevodchik88@yandex.ru

в себе компьютерную (или математическую) лингвистику и машинное обучение (подробнее см. [2]).

Если говорить о цели данного исследования, то в центре внимания авторов находится исследование вопросов применения графовых n -грамм в задаче атрибуции текстов. Подобные структуры позволяют сравнивать разные тексты на основании объективных, количественно выраженных параметров (например, соотношение разных частей речи в пределах текста, длина синтаксических конструкций, частота связей между различными частями речи и т. п.).

2 Гибридные модели атрибутируемого текста

В отличие от других видов моделей, в графовых моделях указываются взаимосвязи между конструкциями текста (словами и предложениями). В связи с бурным развитием вычислительной техники наблюдается тенденция усложнения графовых структур, возникающих при моделировании сложных объектов на стыке математики, информационных технологий и гуманитарных наук. Например, в [1] приводятся описания таких понятий, как нечеткий граф, темпоральный граф и иерархический граф. Все чаще в научных исследованиях используются метаграфы [3]: здесь метавершина может включать как вершины (или метавершины), так и ребра; ребро метаграфа может соединять вершины внутри одной метавершины, вершины между различными метавершинами, метавершины, а также вершины и метавершины. В [4] определяется понятие вложенного метаграфа (n -уровневого графа) как обобщения графов, гиперграфов и метаграфов. При этом он позволяет задавать ориентацию ребер.

Рассмотренное авторами рекурсивное определение обобщенной контекстно-зависимой теоретико-графовой модели для решения задачи анализа текстов изложено в [1]. Она позволяет строить новые гибридные модели, которые можно впоследствии использовать для получения новых информативных признаков для проведения атрибуции. Рассмотрим фрагмент текста «Дворянин, желающий быть крестьянином» (журнал «Время», 1861, № 12), который «с давних времен приписывается Достоевскому» [5, с. 278], однако однозначно авторство не установлено (см. работы Б. В. Томашевского, В. С. Нечаева, Г. Хетсо и др.): *«Антагонизмъ двухъ лагерей существуетъ; реформа 19 февраля стремится къ его уничтоженію, къ сглаженію неравноправности; но явленіе, укоренившееся исторіей, не сглаживается въ одинъ день или въ одинъ годъ; оно, старое, тогда только исчезнетъ, когда новое будетъ приобрѣтено вполнѣ»*. Число слов в тексте $K = 37$. Каждому слову можно поставить в соответствие часть речи: N — существительное; A — прилагательное; C — местоимение; O — числительное; V — глагол; E — причастие; G — деепричастие; D — наречие; S — категория состояния; P — предлог; L — союз; U — частица; I — междометие. В табл. 1 представлено множество слов текста $W = \{w_k\}_{k=1}^{37}$.

Первую теоретико-графовую модель построим на основе дерева зависимостей. Такая структура позволяет наглядно изобразить синтаксические связи

Таблица 1 Соответствие вершин и слов текста «Антагонизмъ двухъ лагерей...»

№	Подмножества слов	Вершина	Группы	Функция принадлежности
1	$W_1 = \{w_1\}$: «Антагонизмъ»	v_1	$\alpha(v_1) = N$	$\mu(v_1) = 1$
2	$W_2 = \{w_2\}$: «двухъ»	v_2	$\alpha(v_2) = O$	$\mu(v_2) = 1$
3	$W_3 = \{w_3\}$: «лагерей»	v_3	$\alpha(v_3) = N$	$\mu(v_3) = 1$
4	$W_4 = \{w_4\}$: «существуетъ»	v_4	$\alpha(v_4) = V$	$\mu(v_4) = 1$
...
37	$W_{37} = \{w_{37}\}$: «вполнѣ»	v_{37}	$\alpha(v_{37}) = D$	$\mu(v_{37}) = 1$
38	—	v_{38}	$\alpha(v_{38}) = F$	$\mu(v_{38}) = 1$
39	$W_{38} = \{w_1, w_2, w_3, w_4\}$: «Антагонизмъ», «двухъ», «лагерей», «существуетъ»	v_{39}	—	$\mu(v_{39}) = 1$
40	$W_{39} = \{w_5, w_6, w_7, w_8, w_9, w_{10}, w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}\}$: «реформа», «19», «февраля», «стремитя», «къ», «его», «уничтоженію», «къ», «сглаженію», «неравноправности»	v_{40}	—	$\mu(v_{40}) = 1$
41	$W_{40} = \{w_{15}, w_{16}, w_{17}, w_{18}, w_{19}, w_{20}, w_{21}, w_{22}, w_{23}, w_{24}, w_{25}, w_{26}, w_{27}\}$: «но», «явленіе», «укоренившееся», «исторіей», «не», «сглаживается», «въ», «одинъ», «день», «или», «въ», «одинъ», «годъ»	v_{41}	—	$\mu(v_{41}) = 1$
42	$W_{41} = \{w_{28}, w_{29}, w_{30}, w_{31}, w_{32}\}$: «оно», «старое», «тогда», «только», «исчезнетъ»	v_{42}	—	$\mu(v_{42}) = 1$
43	$W_{42} = \{w_{33}, w_{34}, w_{35}, w_{36}, w_{37}\}$: «когда», «новое», «будетъ», «приобрѣтено», «вполнѣ»	v_{43}	—	$\mu(v_{43}) = 1$
44	$W_{43} = \{w_1, w_3, w_5, w_7, w_{11}, w_{13}, w_{14}, w_{16}, w_{18}, w_{23}, w_{27}, w_{29}, w_{34}\}$: «Антагонизмъ», «лагерей», «реформа», «февраля», «уничтоженію», «сглаженію», «неравноправности», «явленіе», «исторіей», «день», «годъ», «старое», «новое»	v_{44}	$\alpha(v_{44}) = N$	$\mu(v_{44}) = 1$

Окончание табл. 1 на с. 118

Таблица 1 (окончание) Соответствие вершин и слов текста «Антагонизм двух лагерей...»

№	Подмножества слов	Вершина	Группы	Функция принадлежности
45	$W_{44} = \{w_2, w_6, w_{22}, w_{26}\}$: «двух», «19», «один», «один»	v_{45}	$\alpha(v_{45}) = O$	$\mu(v_{45}) = 1$
46	$W_{45} = \{w_{10}, w_{28}\}$: «его», «оно»	v_{46}	$\alpha(v_{46}) = C$	$\mu(v_{46}) = 1$
47	$W_{46} = \{w_4, w_8, w_{20}, w_{32}, w_{35}\}$: «существует», «стремится», «сглаживается», «исчезнет», «будет»	v_{47}	$\alpha(v_{47}) = V$	$\mu(v_{47}) = 1$
48	$W_{47} = \{w_{17}, w_{36}\}$: «укоренившееся», «приобрѣтено»	v_{48}	$\alpha(v_{48}) = E$	$\mu(v_{48}) = 1$
49	$W_{48} = \{w_{30}, w_{37}\}$: «тогда», «вполнѣ»	v_{49}	$\alpha(v_{49}) = D$	$\mu(v_{49}) = 1$
50	$W_{49} = \{w_{19}, w_{31}\}$: «не», «только»	v_{50}	$\alpha(v_{50}) = U$	$\mu(v_{50}) = 1$
51	$W_{50} = \{w_9, w_{12}, w_{21}, w_{25}\}$: «кѣ», «кѣ», «вѣ», «вѣ»	v_{51}	$\alpha(v_{51}) = P$	$\mu(v_{51}) = 1$
52	$W_{51} = \{w_{15}, w_{24}, w_{33}\}$: «но», «или», «когда»	v_{52}	$\alpha(v_{52}) = L$	$\mu(v_{52}) = 1$

в предложении и на их основе построить ряд признаков, которые можно использовать в атрибуции художественных текстов [6]. Здесь выделяются 38 вершин $V = \{v_i\}_{i=1}^{38}$, которые соответствуют следующим подмножествам слов W_i (см. табл. 1). Функция α задает часть речи для v_i . При этом буквой F обозначим фиктивную вершину, не связанную со словами. Функция принадлежности μ для всех вершин и ребер принимает значение 1 (объекты однозначно определены), т. е. $\mu(v_i) = \mu(e_j) = 1$.

Фрагмент теоретико-графовой модели предложения «Антагонизм двух лагерей...» представлен на рис. 1 (здесь отсутствует иерархия).

Вторая модель образуется из вершин v_{39}, \dots, v_{43} и отражает синтаксическую структуру связей между простыми предложениями в составе многокомпонентного сложного предложения. Структурно фрагмент можно представить следующим образом: [Антагонизм двух лагерей существует;]₁ [реформа 19 февраля стремится кѣ его уничтоженію, кѣ сглаженію неравноправности;]₂ [но явление, укоренившееся исторіей, не сглаживается вѣ одинъ день или вѣ одинъ годъ;]₃ [оно, старое, тогда только исчезнетъ,]₄ [когда новое будетъ приобрѣтено вполнѣ]₅. Связи делятся на группы: e_{38} — бессоюзные предложения (БСП) со значением перечисления; e_{39} — сложносочиненные предложения (ССП) с противительным

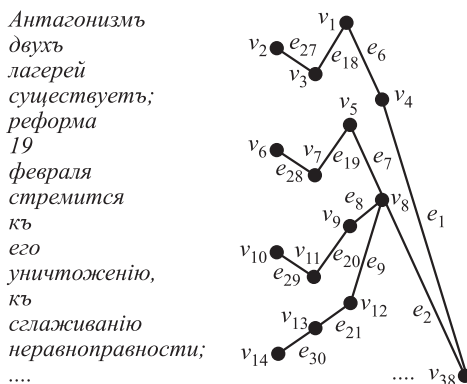


Рис. 1 Фрагмент дерева зависимости предложения «Антагонизм двух лагерей...»

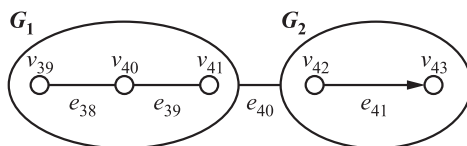


Рис. 2 Структурная модель сложного предложения «Антагонизм двух лагерей...»

союзом *но* (отношения сопоставления); e_{40} — БСП со значением пояснения; e_{41} — сложноподчиненные предложения (СПП) с придаточным времени (рис. 2).

Третья модель [1] описывает, как в тексте сочетаются слова разных грамматических классов (каждая вершина графа $v_{44}, v_{45}, \dots, v_{52}$ соответствует определенной части речи). Если относительная частота таких связей превышает

Таблица 2 Матрица сильных связей (пороговое значение $a = 0,02$)

Часть речи	Существительное (N)	Числительное (O)	Местомимение (C)	Глагол (V)	Причастие (E)	Наречие (D)	Частица (U)	Предлог (P)	Союз (L)
N	0,02778	0,05556	0,02778	0,08333	0,02778	0,02778	0,02778	0,02778	0,05556
O	0,11111	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0,05556	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0,02778	0	0	0	0,02778	0	0	0,05556	0,02778
E	0,02778	0	0	0	0	0,02778	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0,02778	0	0
U	0	0	0	0,05556	0	0	0	0	0
P	0,02778	0,05556	0,02778	0	0	0	0	0	0
L	0,05556	0	0	0	0	0	0	0,02778	0

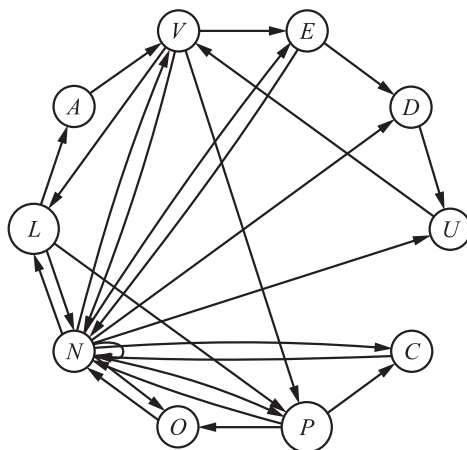


Рис. 3 Граф «сильных» связей

заранее заданный порог, то связь считается «сильной» и отображается в матрице (в табл. 2 пороговое значение выбрано на уровне $a = 0,02$). Количественное значение можно сохранить в обобщенной модели как значение функции μ . Например, связь между грамматическими классами «существительное» и «числительное» соответствует $\mu(e_{43} = (v_{44}, v_{45})) = 0,05556$. Стрелки на рис. 3 отражают последовательность встречаемости двух слов определенных частей речи (биграму).

3 Графовые n -граммы

К одним из значимых характеристик, используемых при решении задачи атрибуции текстов, относятся n -граммы (см. примеры в [5, с. 152–154]). Это последовательности текстовых элементов (букв, слов, лемм, тегов частей речи и т. д.), взятых в порядке их появления в тексте. Значение n указывает, сколько элементов должно быть взято, и определяет размер последовательности. В терминах обобщенной модели можно определить n -грамму следующим образом:

- (1) первый случай: биграмма (2-грамма). Определим две части речи t_1 и t_2 . Выделим два подмножества слов текста W'_1 и W'_2 , которые соответствуют частям речи t_1 и t_2 , т. е. для любых $w_i \in W'_1$ и $w_j \in W'_2$ выполняется $\alpha(w_i) = t_1$ и $\alpha(w_j) = t_2$. Если слова w_i и w_j идут последовательно, т. е. $j = i + 1$, то они образуют биграмму. Кстати, части речи и соответственно подмножества слов W'_1 и W'_2 могут совпадать;
- (2) второй случай: триграмма (3-грамма). На этот раз определим три части речи: t_1 , t_2 и t_3 . Выделим три подмножества слов текста W'_1 , W'_2 и W'_3 , которые соответствуют частям речи t_1 , t_2 и t_3 , т. е. для любых $w_i \in W'_1$,

$w_j \in W'_2$ и $w_k \in W'_3$ выполняется $\alpha(w_i) = t_1$, $\alpha(w_j) = t_2$ и $\alpha(w_k) = t_3$. Если слова w_i , w_j и w_k идут последовательно, т. е. $k = j + 1 = i + 2$, то они образуют триграмму;

- (3) третий (общий) случай: n -грамма. Рассмотрим n частей речи: t_1, t_2, \dots, t_n . Выделим n подмножеств слов текста W'_1, W'_2, \dots, W'_n , которые соответствуют частям речи t_1, t_2, \dots, t_n , т. е. для любых $w_{ij} \in W'_i$ выполняется $\alpha(w_{ij}) = t_i$. Если n слов соответственно из W'_1, W'_2, \dots, W'_n идут последовательно, то они образуют n -грамму.

Традиционные n -граммы строятся на синтагматических связях (последовательностях слов в тексте), а потому не позволяют в полной мере учитывать взаимосвязи между словами, связанными подчинительной связью, но при этом удаленными друг от друга (это особенно важно для текстов, написанных на русском языке, поскольку для них характерен достаточно свободный порядок слов).

Назовем *графовой n -граммой* связный подграф обобщенной теоретико-графовой модели, состоящий из n вершин, каждой из которых ставится в соответствие подмножество слов в тексте. Рассмотрим пример: упорядоченному подмножеству слов «реформа 19 февраля стремится» будет соответствовать графовая n -грамма, изображенная на рис. 4 (при этом традиционная 4-грамма выглядит как «существительное–числительное–существительное–глагол», т. е. строка $N-O-N-V$ без учета связей).

реформа
19
февраля
стремится

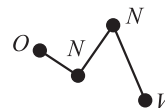


Рис. 4 Графовая n -грамма (первый пример)

Если задача поиска традиционной n -граммы сводилась к поиску подстроки в строке, то здесь мы имеем дело с поиском изоморфного подграфа, в котором вершины упорядочены. Отметим, что подобные модели в упрощенном виде ранее уже применялись в стилистических исследованиях. Например, в [7] автор рассматривает такие «конструкции», которые записываются «... в виде двоеточия, слева от которого указывается число членов, расположенных перед сказуемым, а после двоеточия — после него», а затем показывает, как подсчитываются их частоты и строится ранговое распределение линеаризованных синтаксических конструкций. Другие примеры можно найти в работах Г. О. Сидорова [8], где автор описывает синтаксические n -граммы, построенные нелинейным способом на основе анализа путей в синтаксических деревьях. Нелинейный принцип построения лежит и в основе так называемых *skipgram* [9], где в последовательности элементов случайным образом пропускаются некоторые из них.

Рассмотрим, какие преимущества дают гибридные модели для построения различных видов графовых n -грамм. Вернемся в примеру на рис. 4. Как видно по табл. 1, словам w_5 , w_6 , w_7 и w_8 соответствуют не только вершины v_5 , v_6 , v_7 и v_8 , но и вершина v_{40} из второй модели, объединяющая данные слова. Таким образом, можно определить два условия формирования графовой n -граммы:

- (1) слова w_5, w_6, w_7 и w_8 образуют графовую n -грамму тогда и только тогда, когда существует некоторое подмножество W_i , соответствующее вершине v_j второй модели, куда входят эти слова. Более строгое условие заключается в том, что слова образуют данное подмножество W_i , т. е. $W_i = \{w_5, w_6, w_7, w_8\}$, однако для данного примера оно не выполняется;
- (2) слова w_5, w_6, w_7 и w_8 образуют графовую n -грамму тогда и только тогда, когда не существует такого подмножества W_i , соответствующего вершине v_j второй модели, куда бы входили все эти слова. Например, для подстроки «*только (w₃₁) исчезнет (w₃₂), когда (w₃₃) новое (w₃₄) будет (w₃₅) приобретено (w₃₆)*» (U-V-L-N-V-E) слова $w_{31}, w_{32} \in W_{41}$, тогда как $w_{33}, w_{34}, w_{35}, w_{36} \in W_{42}$ (рис. 5).

*только
исчезнет,
когда
новое
будет
приобретено*

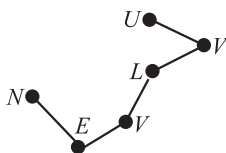


Рис. 5 Графовая n -грамма (второй пример)

и глаголом — 0,02778 (см. табл. 2). Поэтому такую графовую n -грамму можно использовать в исследовании. Если же на рисунке обнаруживается «слабая связь» ($a < 0,02$), то графовая n -грамма уже далее не анализируется. Например, на рис. 5 отсутствует «сильная связь» между союзом и глаголом (значение равно 0).

Подобный способ определения n -грамм потенциально представляется более чувствительным к изменению авторского стиля, так как помимо синтагматических связей учитывает ряд других факторов, связанных с построением предложений, от стремления сочетать подчинительной связью те или иные части речи до предрасположенности к инверсии — сознательной перестановке слов или словосочетаний — как стилистическому приему, отличающему индивидуально-авторский стиль. Таким образом, можно получить более совершенный инструмент для идентификации автора, поскольку отличия в индивидуально-авторском стиле могут проявляться не только в определенных последовательностях частей речи, но и в изменении порядка слов, а также в особом расположении слов в предложении (в качестве примера можно сравнить общеизвестную строку с инверсией «*Я памятник себе воздвиг нерукотворный*» из стихотворения А. С. Пушкина и нормативное «*Я воздвиг себе нерукотворный памятник*»). Таким образом, подобный анализ становится особенно актуален для поэтических текстов, в которых инверсия — весьма распространенное явление.

4 Заключение

Значимое практическое преимущество рассмотренной графовой модели заключается в возможности синтеза различных подходов к анализируемым текстам.

С другой стороны, если обратиться к третьей модели, слова w_5, w_6, w_7 и w_8 также соответствуют вершинам v_{44}, v_{45} и v_{47} . Между этими вершинами существуют «сильные связи»: между существительными — 0,02778, между числительным и существительным — 0,11111, между существитель-

В частности, в поле зрения исследователя оказываются и морфологические параметры (распределение слов текста по частям речи), и синтаксические структуры, указывающие на взаимосвязь слов в пределах предложения. Комбинация двух этих составляющих грамматического уровня языка позволяет отыскивать как типичные для определенной эпохи или стиля черты, так и уникальные составляющие, отличающие индивидуально-авторский стиль того или иного писателя или поэта, что позволяет более эффективно решать вопросы, связанные с атрибуцией текстов. Проведенные эксперименты на большом объеме текстового материала [1, 5] подтверждают выводы авторов.

Таким образом, исследование фольклорных и литературных текстов с использованием обобщенной контекстно-зависимой теоретико-графовой модели позволяет строить гибридные структуры, основанные на различных теоретико-графовых моделях языковой структуры, что позволяет извлекать новые знания о стилистической структуре. Одним из потенциально эффективных инструментов представляется извлечение и подсчет встречаемости в текстовых фрагментах графовых n -грамм, которые являются обобщением традиционных n -грамм, синтаксических n -грамм и других подобных конструкций. Также рассмотрен формат для хранения текстов, их обобщенных графовых моделей и графовых n -грамм. Данный инструмент предлагает верифицируемые, опирающиеся на объективные грамматические параметры текста данные, которые в дальнейшем могут быть использованы в математико-лингвистических исследованиях. В частности, идеи, изложенные в данной работе, можно использовать при решении различных задач анализа текстов (например, поиск плагиата, неоднородных текстовых фрагментов, атрибуции, анализа тональности текстов и др.).

Литература

1. *Москин Н. Д.* Теоретико-графовые модели, методы и программные средства интеллектуального анализа текстовой информации на примере фольклорных и литературных произведений: Дис. . . . д-ра техн. наук. — Петрозаводск, 2022. 370 с.
2. *Белов С. Д., Зрелова Д. П., Зрелов П. В., Кореньков В. В.* Обзор методов автоматической обработки текстов на естественном языке // Системный анализ в науке и образовании, 2020. № 3. С. 8–22. doi: 10.37005/2071-9612-2020-3-8-22. EDN: YJFAUK.
3. *Целых А. А., Дедюлина М. А.* Теоретико-графовые подходы к моделированию актор-сетей в исследованиях науки и технологий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2018. Т. 6. № 4. С. 244–259. doi: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.019. EDN: YZSOGL.
4. *Астанин С. В., Драгныш Н. В., Жуковская Н. К.* Вложенные метаграфы как модели сложных объектов // Инженерный вестник Дона, 2012. № 4. Ч. 2. Ст. 1434. 5 с. EDN: PVJCYN.
5. *Рогов А. А., Абрамов Р. В., Бучнева Д. Д., Захарова О. В., Кулаков К. А., Лебедев А. А., Москин Н. Д., Отливанчик А. В., Савинов Е. Д., Сидоров Ю. В.*

Проблема атрибуции в журналах «Время», «Эпоха» и еженедельнике «Гражданин». — Петрозаводск: Острова, 2021. 391 с. EDN: AIACMP.

6. *Севбо И. П.* Графическое представление синтаксических структур и стилистическая диагностика. — Киев: Наукова думка, 1981. 192 с.
7. *Мартынченко Г. Я.* Методы математической лингвистики в стилистических исследованиях. — СПб.: Нестор-История, 2019. 296 с.
8. *Сидоров Г. О.* Синтаксические n -граммы в компьютерной лингвистике. — М.: Изд-во Московского ун-та, 2018. 120 с.
9. *Cheng W., Greaves C., Warren M.* From n -gram to skipgram to conogram // Int. J. Corpus Linguis., 2006. Vol. 11. Iss. 4. P. 411–433. doi: 10.1075/ijcl.11.4.04che.

Поступила в редакцию 01.07.23

GRAPH n -GRAMS IN THE TEXT ATTRIBUTION PROBLEM

N. D. Moskin, A. A. Rogov, and A. A. Lebedev

Petrozavodsk State University, 33 Lenina Prosp., Petrozavodsk 185910, Russian Federation

Abstract: The paper presents the results of research in the field of modeling the structure of texts using a generalized context-dependent graph-theoretic model. The object of the study is mainly literary and folklore texts for which the task of attribution arises. For example, there are many such texts in the works of the famous Russian writer F. M. Dostoevsky. The authors show how it is possible to build hybrid models based on dependency trees, graph models of syntactic structure of links between simple sentences in a multicomponent complex sentence, and “strong links” graphs of word combinations of different grammatical classes. Such models make it possible to construct new informative features that are potentially applicable in the attribution of texts. An example is the frequency of occurrence of graph n -grams which are generalizations of ordinary n -grams syntactic n -grams, and other similar constructions used in stylistic studies. The article also discusses the format for storing texts, their generalized graph models, and graph n -grams.

Keywords: artificial intelligence; text attribution; graph; metagraph; hybrid graph; folklore text; literary text; graph n -gram

DOI: 10.14357/08696527230411

EDN: ANMCWW

References

1. Moskin, N. D. 2022. Teoretiko-grafovye modeli, metody i programmnye sredstva intellektual'nogo analiza tekstovoy informatsii na primere fol'klornykh i literaturnykh proizvedeniy [Graph-theoretical models, methods, and software tools for intellectual

- analysis of textual information on the example of folklore and literary works]. Petrozavodsk. D.Sc. Diss. 370 p.
2. Belov, S. D., D. P. Zrelova, P. V. Zrelov, and V. V. Koren'kov. 2020. Obzor metodov avtomaticheskoy obrabotki tekstov na estestvennom yazyke [Overview of methods for automatic natural language text processing]. *Sistemnyy analiz v nauke i obrazovanii* [System Analysis in Science and Education] 3:8–22. doi: 10.37005/2071-9612-2020-3-8-22. EDN: YJFAYK.
 3. Tsel'ykh, A. A., and M. A. Dedulina. 2018. Teoretiko-grafovye podkhody k modelirovaniyu aktor-setey v issledovaniyakh nauki i tekhnologii [Graph-theoretic approaches to modeling actor-networks in science and technology studies]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology] 6(4):244–259. doi: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.019. EDN: YZSOGL.
 4. Astanin, S. V., N. V. Dragnysh, and N. K. Zhukovskaya. 2012. Vlozhennyye metagrafy kak modeli slozhnykh ob'ektov [Nested metagraphs as models of complex object]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering J. of Don] 4-2:1434. 5 p. EDN: PVJCYN.
 5. Rogov, A. A., R. V. Abramov, D. D. Buchneva, O. V. Zakharova, K. A. Kulakov, A. A. Lebedev, N. D. Moskin, A. V. Otlivanchik, E. D. Savinov, and Yu. V. Sidorov. 2021. *Problema atributsii v zhurnalakh "Vremya," "Epokha" i ezhenedel'nik "Grazhdanin"* [The problem of attribution in the magazines "Time," "Epoch," and the weekly "Citizen"]. Petrozavodsk: Ostrova. 391 p. EDN: AIACMP.
 6. Sevbo, I. P. 1981. *Graficheskoe predstavlenie sintaksicheskikh struktur i stilisticheskaya diagnostika* [Graphic representation of syntactic structures and stylistic diagnostics]. Kyiv: Naukova dumka. 192 p.
 7. Martynenko, G. Ya. 2019. *Metody matematicheskoy lingvistiki v stilisticheskikh issledovaniyakh* [Methods of mathematical linguistics in stylistic research]. Saint Petersburg: Nestor-History Publishing House. 296 p.
 8. Sidorov, G. O. 2018. *Sintaksicheskie n -grammy v komp'yuternoy lingvistike* [Syntactic n -grams in computational linguistics]. Moscow: Moscow University Press. 120 p.
 9. Cheng, W., C. Greaves, and M. Warren. 2006. From n -gram to skipgram to conogram. *Int. J. Corpus Linguis.* 11(4):411–433. doi: 10.1075/ijcl.11.4.04che.

Received July 1, 2023

Contributors

Moskin Nikolai D. (b. 1980) — Doctor of Science in technology, associate professor, Petrozavodsk State University, 33 Lenina Prosp., Petrozavodsk 185910, Russian Federation; moskin@petsu.ru

Rogov Alexander A. (b. 1959) — Doctor of Science in technology, head of department, Petrozavodsk State University, 33 Lenina Prosp., Petrozavodsk 185910, Russian Federation; rogov@petsu.ru

Lebedev Alexander A. (b. 1988) — Candidate of Science (PhD) in philology, associate professor, Petrozavodsk State University, 33 Lenina Prosp., Petrozavodsk 185910, Russian Federation; perevodchik88@yandex.ru

НАУЧНАЯ ПАРАДИГМА ИНФОРМАТИКИ: КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНСФОРМАЦИЙ ОБЪЕКТОВ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ*

*И. М. Зацман*¹

Аннотация: Дано описание первых результатов создания классификации трансформаций объектов предметной области информатики как составляющей системы научного знания, охватывающей широкий спектр информационных и компьютерных наук. Границы ее предметной области, которая таким образом значительно расширена, определяются в рамках концепции полиадического компьютеринга Пола Розенблума. Все сущности информатики в статье разделены на два глобальных класса: объекты и их трансформации. Для каждого такого класса в процессе создания научной парадигмы информатики конструируется своя классификация, с формирования этих классификаций и началось ее построение. В данной статье рассматриваются два верхних уровня только классификации трансформаций объектов предметной области. Основанием для построения самого верхнего уровня служит предлагаемое деление предметной области информатики на среды (ментальная, сенсорно воспринимаемая, цифровая и ряд других сред), каждая из которых включает объекты одной природы. При этом известны примеры появления в предметной области информатики ранее не использовавшихся сред. Так, с созданием информационных технологий (ИТ), применяющих интерфейсы «мозг–компьютер», в предметную область логичным было включение объектов нейросреды, а с разработкой методов и средств для длительного хранения данных большого объема с использованием синтезированных цепочек ДНК — объектов ДНК-среды. Основанием для построения следующего уровня классификации трансформаций объектов служит типология знаковых систем А. Соломоника. Цель статьи состоит в описании, с одной стороны, двух верхних уровней классификации трансформаций объектов информатики, с другой стороны, метода генерации таблиц, детализирующих эту классификацию, что дает возможность соотнести категории трансформаций объектов в таблицах с интерфейсами, реализованными в системах и средствах информатики. Сгенерированные таблицы включают категории трансформаций, которым соответствуют как уже известные интерфейсы, так и теоретически возможные, но еще не реализованные в системах и средствах информатики.

Ключевые слова: объекты предметной области; трансформации объектов; классификация; среда предметной области; парадигма информатики

DOI: 10.14357/08696527230412

EDN: ZIKUWO

*Исследование выполнено 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, izatsman@yandex.ru

1 Введение

На первых этапах становления информатики объектами ее исследований были в основном компьютеры и окружающие их явления. Например, в 1967 г. А. Ньюэлл, А. Дж. Перлис и Х. А. Саймон писали: «Везде, где есть феномены, может существовать наука для их описания и объяснения. . . Феномены порождают науки. Есть компьютеры. Следовательно, информатика [в оригинале — computer science] предназначена для описания и изучения компьютеров. Явления, окружающие компьютеры, разнообразны, сложны и ценны» [1]. Подход к определению информатики как компьютерной науки без учета влияния человека на результаты работы систем и средств информатики долгие годы был доминирующим, в том числе в системе компьютерного образования. Например, в вузовском учебнике по информатике можно было встретить такое утверждение: «Для информатики как технической науки понятие информации не может основываться на таких антропоцентрических понятиях, как знание» [2, с. 17]. В контексте позиционирования информатики как технической науки в ее предметной среде неявно учитывались объекты только двух сред: сенсорно воспринимаемой и цифровой, охватывающей компьютерные коды, а ментальные объекты не принимались во внимание.

В 1986 г. Кристен Ньюгор (один из создателей языка программирования Симула) предложил концептуально иной подход к определению информатики [3]. Второй раздел «The definition of the term “informatics”» его доклада на конгрессе IFIP был посвящен определению термина «информатика». Сначала в этом разделе Кристен Ньюгор говорит: «Термин “computer science” следует заменить на “informatics”. Несколько лет назад выбор между этими двумя терминами казался, скорее всего, несущественным. Обсуждения терминологии часто считают праздными, но иногда они могут отражать ключевые различия во мнениях или по крайней мере существенные акценты. Сегодня, к сожалению, используется термин “computer science”. Этот термин имеет тенденцию поддерживать слишком узкое представление об информационных системах, которые в настоящее время интегрируют коллективы людей и разнообразные средства обработки информации, взаимодействующие как посредством межличностных связей, так и посредством (все возрастающей доли) электронных каналов связи» [3].

Затем, после констатации важности четкого определения терминов «информатика» и «информация», Кристен Ньюгор предлагает свою дефиницию первого термина: «Информатика — это наука, которая имеет своей областью [исследований] информационные процессы и *связанные с ними феномены в артефактах, обществе и природе* (курсив мой — И. З.)» [3]. Далее Кристен Ньюгор цитирует определение понятия «феномен» по словарю Webster 1960 г. («любой факт, обстоятельство или событие, которые сенсорно воспринимаются и могут быть научно описаны или оценены» [4]).

Предложение учитывать влияние человека имплицитно вводит в предметную область информатики объекты среды новой природы — *ментальной* (например, результаты процессов генерации научного знания, происходящих в сознании

исследователей). Отметим, что *сенсорно воспринимаемая среда* содержит, в частности, знаковые формы представления результатов процессов генерации знания после его деления на концепты. В результате, согласно Кристену Ньюгору, по сравнению с техническим подходом к определению информатики, число сред ее предметной области расширяется до трех: *ментальная, сенсорно воспринимаемая и цифровая*.

Однако в настоящее время она не ограничена только этими тремя средами. С появлением интерфейса «мозг–компьютер» были добавлены объекты *нейросреды*. Разработка методов записи и хранения данных с использованием синтезированных цепочек ДНК обусловила добавление *ДНК-среды* и ее объектов. Не исключено и дальнейшее увеличение числа сред разной природы в предметной области информатики. Это может произойти, например, в том случае, когда при проектировании будущих ИТ встретятся сущности, которые по своей природе не относятся ни к одной из сред, ранее включенных в предметную область информатики [5]. Подобное увеличение числа сред разной природы не наблюдается ни в естественных, ни в гуманитарных науках, что существенно усложняет позиционирование информатики в традиционной дихотомии системы научного знания: точные и естественные — социально-гуманитарные науки.

В статье границы предметной области информатики определяются в рамках концепции полиадического компьютеринга Пола Розенблума [6]. На основе этой концепции предпринята попытка создать научную парадигму информатики [7–10] с учетом расширения ее предметной области, предложенного Розенблумом. В процессе создания парадигмы все сущности ее предметной области, значительно им расширенной, были разделены на два глобальных класса: объектов сред предметной области и их трансформаций. Для каждого из них было начато формирование своей классификации. В данной статье дано описание двух верхних уровней только классификации трансформаций объектов предметной области информатики. Основанием для построения самого верхнего уровня служит деление ее предметной области на среды (ментальную, сенсорно воспринимаемую, цифровую и ряд других сред), каждая из которых включает объекты одной природы [7, 8]. Основанием для построения следующего уровня классификации трансформации объектов служит типология знаковых систем [11], перечень видов которых приводится в следующем разделе. Цель статьи состоит в описании, с одной стороны, двух уровней классификации трансформаций объектов информатики, с другой стороны, метода генерации таблиц, детализирующих классификацию трансформаций объектов, что дает возможность соотнести теоретические трансформации с практическими интерфейсами, реализованными в системах и средствах информатики.

2 Классификации объектов и их трансформаций

В работе [8] дано описание *основания классификации объектов* предметной области информатики для случая следующих пяти ее сред, включающих объекты одной и той же природы:

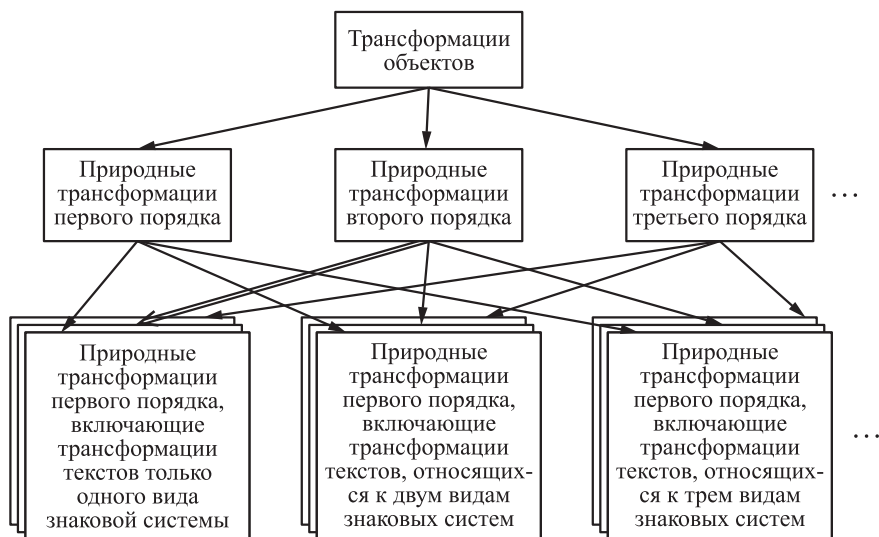
- (1) ментальная среда — это совокупность когнитивных феноменов, используемых и/или формируемых в процессе познания, происходящего в сознании людей (феномены, формируемые как смысловые элементы знания в процессах познания с использованием знаковых систем, будем называть концептами);
- (2) сенсорно воспринимаемая среда, которую для краткости иногда будем называть *информационной* средой — это совокупность сенсорно воспринимаемых феноменов, находящихся вне сознания, но взаимодействующих с когнитивными феноменами ментальной среды;
- (3) цифровая среда — это совокупность компьютерных кодов;
- (4) нейросреда — это электрические потенциалы и магнитные поля, генерируемые мозгом, которые используются, например, в ИТ управления роботизированной рукой [12] и в других ИТ, применяющих интерфейсы «мозг–компьютер»;
- (5) ДНК-среда — это совокупность цепочек РНК и ДНК¹.

Как было отмечено выше, дальнейшее увеличение числа сред в предметной области информатики может произойти, например, при проектировании ИТ будущих поколений. Основанием для построения верхнего уровня классификации трансформаций объектов служит *степень разнообразия природы объектов*, вовлеченных в трансформации:

- первый класс верхнего уровня классификации включает трансформации объектов в пределах среды только одной природы (далее природные трансформации первого порядка); например, конкатенация трехзначных чисел N с $2N$ и $3N$, результат которой содержит 9 цифр кроме 0, может служить примером трансформации первого порядка [13];
- второй класс включает трансформации объектов, относящихся к двум средам разной природы (далее — природные трансформации второго порядка); например, компьютерное кодирование текстов с помощью таблиц Unicode или представление ментальных понятий (концептов) словами естественного языка;
- третий и последующие классы включают трансформации объектов, относящихся к трем и более средам разной природы (далее — природные трансформации третьего и более высоких порядков); например, присвоение одного компьютерного кода (цифровая среда) понятию (= концепту ментальной среды) и слову как сочетанию букв (информационная среда), которое его выражает, что относится к третьему порядку трансформаций объектов [14].

Основанием для построения второго уровня классификации трансформаций объектов служит следующая типология знаковых систем А. Соломоники [11, с. 131]: естественные знаковые системы, образные, естественно-язы-

¹ Например, модели трансляции естественных ДНК, созданные микробиологами, используются в информатике при разработке методов и средств записи для длительного хранения данных большого объема с использованием синтезированных цепочек ДНК.



Два верхних уровня классификации трансформаций объектов

ковые, вербально-несловесные системы записи¹ и формализованные знаковые системы², включая математические. Введем понятие обобщенного текста — это текст, который может быть создан в любой из перечисленных знаковых систем. Тогда обобщенные тексты могут быть естественными, образными, естественно-языковыми, вербально-несловесными и формализованными. Второй уровень классификации трансформаций в этой статье охватывает не все виды объектов предметной области информатики, а только перечисленные 5 видов текстов, *вовлеченных в процесс трансформаций*. Этот уровень содержит следующие классы (см. рисунок):

- первый класс второго уровня классификации включает трансформации текстов только одного вида знаковой системы (далее — знаковые трансформации первого порядка), например перевод естественно-языковых текстов с одного языка на другой³;

¹Под системой записи понимается знаковая система, сочетающая вербальные знаки с несловесными (языки нотной записи, карт, таблиц и др.).

²В двух последующих монографиях А. Соломоник делит формализованные системы на знаковые формализованные системы первого и второго порядка [15, с. 76; 16, с. 64].

³Отметим, что пример перевода текста с одного языка на другой как знаковая трансформация *первого порядка* на втором уровне классификации относится к классу природных трансформаций *второго порядка* на верхнем уровне классификации трансформаций объектов, что выделено двойной стрелкой на рисунке. По определению такая природная трансформация относится к двум средам разной природы: сенсорно воспринимаемая и цифровая среды для машинного перевода или ментальная и сенсорно воспринимаемая среды для человека-переводчика.

- второй класс включает трансформации текстов, относящихся к двум видам знаковых систем (далее — знаковые трансформации второго порядка), например формирование в редакторе Word на основе параллельных текстов на двух естественных языках (естественно-языковые знаковые системы) таблицы, каждая строка которой содержит оригинальное предложение в первом столбце и его перевод во втором (вербально-несловесная система записи);
- третий и последующие классы включают трансформации текстов, относящихся к трем и более видам знаковых систем (далее — знаковые трансформации третьего и более высоких порядков); например, если к формированию таблицы в предыдущем примере добавить запись результата вычисления отношения длины оригинального предложения к длине его перевода для каждой строки, то это будет представлять собой знаковую трансформацию¹ третьего порядка (естественно-языковые знаковые системы → вербально-несловесная система записи → математическая запись вектора отношений длин).

На сегодняшний день процесс построения классификации трансформаций объектов еще далек от завершения². Однако итоги частичного формирования двух верхних ее уровней уже применяются для решения актуальных проблем информатики:

- определение отношений между компонентами модели DIKW (data–information–knowledge–wisdom — данные–информация–знание–мудрость) [9, 10];
- проектирование ИТ извлечения нового знания из данных и/или текстовой информации [17];
- формализация процессов обратимой статистической обработки текстов [18].

3 Метод генерации таблиц

На основе верхнего уровня классификации трансформаций предлагается следующий метод генерации таблиц, детализирующих классификацию трансформаций. Метод предназначен для генерации таблиц категорий трансформаций, которым соответствуют как уже известные интерфейсы, так и теоретически возможные, но еще не реализованные в системах и средствах информатики.

Метод генерации опишем на примере класса «Природные трансформации второго порядка» самого верхнего уровня этой классификации. По определению этот класс включает трансформации объектов, относящихся к двум средам разной природы. Для случая пяти сред (ментальная, сенсорно воспринимаемая, цифровая, нейро- и ДНК-среда) с теоретической точки зрения возможны максимум 20 категорий асимметричных трансформаций (см. *пять строк и пять столбцов* таблицы, начиная со второй строки и второго столбца).

¹Вычисление характеристик текстов будем также называть их знаковыми трансформациями.

²Природные трансформации объектов с указанием их сред в будущем планируется разместить на третьем уровне классификации трансформаций.

Если во второй строке таблицы после названия среды перечислить четыре категории трансформаций ментальных объектов в объекты четырех остальных сред, в третьей строке — сенсорно воспринимаемых объектов в объекты четырех остальных сред, пропуская название среды, в четвертой — цифровых объектов в объекты четырех остальных сред и т. д., то получим ячейки с названиями 20 категорий асимметричных трансформаций (см. таблицу, кроме последней строки и последнего столбца). Например, категория «Ментальные объекты → сенсорно воспринимаемые объекты» (третья ячейка второй строки) реализуется с помощью интерфейсов представления концептов формами знаков, а категория «Сенсорно воспринимаемые объекты → ментальные объекты» (вторая ячейка третьей строки) — с помощью интерфейсов интерпретации (означивания) форм знаков по контексту их использования.

Категория «Сенсорно воспринимаемые объекты → цифровые объекты» (четвертая ячейка третьей строки) реализуется, в частности, с помощью интерфейсов и таблиц кодирования символов компьютерными кодами, а категория «Цифровые объекты → сенсорно воспринимаемые объекты» (третья ячейка четвертой строки) — с помощью интерфейсов и таблиц декодирования.

Таблица содержит все 20 категорий класса «Природные трансформации второго порядка» для случая пяти сред, но не для всех из них в настоящее время реализованы интерфейсы второго порядка [12] в системах и средствах информатики (см., например, категорию «Цифровые объекты → ментальные объекты» и категорию «Ментальные объекты → цифровые объекты» в таблице).

Сгенерированные таблицы содержат весь спектр категорий трансформаций второго порядка для заданного перечня сред. Это дает возможность сопоставить эти категории с интерфейсами, уже реализованными в системах и средствах информатики для рассматриваемого перечня сред, и увидеть теоретически допустимые интерфейсы, которые не реализованы. При этом в случае добавления в предметную область информатики новой среды сгенерированные таблицы категорий будут отражать спектр всех теоретически возможных категорий трансформаций ее объектов (см. шестую строку и шестой столбец таблицы).

В заключение этого раздела отметим, что категориям класса «Природные трансформации второго порядка» соответствуют интерфейсы только второго порядка, а категориям природных трансформаций третьего и более высоких порядков — интерфейсы третьего и более высоких порядков [12]. Соответственно, размерность таблицы категорий, сгенерированной на основе класса «Природные трансформации третьего порядка», будет равна трем, т. е. с увеличением порядка природных трансформаций растет и размерность соответствующих таблиц категорий¹.

¹ Далеко не всегда трансформации третьего и более высоких порядков можно рассматривать как последовательность трансформаций второго порядка, например трансформации в процессе обучения пациента пользованию роботизированной руки (личностные концепты пациента, релевантные его намерениям, сигналы активности мозга как объекты нейросреды и компьютерные коды) [12].

Категории природных трансформаций второго порядка объектов пяти сред и будущей новой среды предметной области информатики

Категории	1. Трансформации в ментальные объекты	2. Трансформации в сенсорно воспринимаемые объекты	3. Трансформации в цифровые объекты	4. Трансформации в ДНК-объекты	5. Трансформации в объекты нейросреды	6. Трансформации в объекты новой среды
1. Трансформации ментальных объектов	Ментальная среда	Ментальные объекты → сенсорно воспринимаемые объекты	Ментальные объекты → цифровые объекты	Ментальные объекты → ДНК-объекты	Ментальные объекты → нейрообъекты	Ментальные объекты → объекты новой среды
2. Трансформации сенсорно воспринимаемых объектов	Сенсорно воспринимаемые объекты → ментальные объекты	Сенсорно воспринимаемая среда	Сенсорно воспринимаемые объекты → цифровые объекты	Сенсорно воспринимаемые объекты → ДНК-объекты	Сенсорно воспринимаемые объекты → нейрообъекты	Сенсорно воспринимаемые объекты → объекты новой среды
3. Трансформации цифровых объектов	Цифровые объекты → ментальные объекты	Цифровые объекты → сенсорно воспринимаемые объекты	Цифровая среда	Цифровые объекты → ДНК-объекты	Цифровые объекты → нейрообъекты	Цифровые объекты → объекты новой среды
4. Трансформации ДНК-объектов	ДНК-объекты → ментальные объекты	ДНК-объекты → сенсорно воспринимаемые объекты	ДНК-объекты → цифровые объекты	ДНК-среда	ДНК-объекты → нейрообъекты	ДНК-объекты → объекты новой среды
5. Трансформации нейрообъектов	Нейрообъекты → ментальные объекты	Нейрообъекты → сенсорно воспринимаемые объекты	Нейрообъекты → цифровые объекты	Нейрообъекты → ДНК-объекты	Нейросреда	Нейрообъекты → объекты новой среды
6. Трансформации объектов новой среды	Объекты новой среды → ментальные объекты	Объекты новой среды → сенсорно воспринимаемые объекты	Объекты новой среды → цифровые объекты	Объекты новой среды → ДНК-объекты	Объекты новой среды → нейрообъекты	Будущая новая среда предметной области

4 Заключение

Как отмечено выше, создание научной парадигмы информатики было начато с построения классификации объектов ее предметной области [7, 8] и классификации их трансформаций с частичным описанием двух ее верхних уровней в этой статье. Для создания парадигмы за основу была взята структура научной парадигмы, которую разработал А. Соломоник для любой «зрелой» науки. Обе эти классификации относятся к одному из ее восьми компонентов, которые, согласно А. Соломоннику, могут разрабатываться отдельно, но объединяются в единую и цельную конструкцию [15, 16], а именно: философские основы, предмет изучения, методы изучения, аксиоматика, классификации науки, система терминов, языки [знаковые системы] науки и методы верификации результатов. Сам термин «научная парадигма» трактуется А. Соломонником в соответствии с теорией Т. Куна, которая описывает процесс смены научных парадигм [19]. При этом А. Соломоник отмечает тот факт, что в книге Куна нет ответа на вопрос: «Из чего должна состоять парадигма “зрелой” науки?»

Таблицы категорий трансформаций объектов предметной области информатики устанавливают зависимость спектра трансформаций от перечня сред, к которым принадлежат взаимодействующие объекты. Как было отмечено, ячейки последней строки и столбца в таблице предсказывают спектр всех теоретически возможных категорий трансформаций объектов новой среды при ее добавлении в предметную область информатики. Другими словами, в случае включения новой среды сгенерированные таблицы дадут весь спектр категорий трансформаций объектов новой среды в объекты других сред и обратно.

В заключение отметим, что создание парадигмы информатики находится на первоначальной стадии, на которой сейчас формируется только один из восьми компонентов — классификации информатики. Для объединения компонентов парадигмы в единую и цельную конструкцию планируется на следующей стадии пересмотреть систему аксиом информатики как фундаментальной науки [20], описав в *единой системе терминов* классификацию объектов информатики, классификацию их трансформаций, свойственные ей методы, включая метод информационно-математических трансформаций [18], а также систему ее аксиом.

Литература

1. Newell A., Perlis A., Simon H. Computer science // Science, 1967. Vol. 157. No. 3795. P. 1373–1374.
2. Симонович С. В. Информатика. Базовый курс. — СПб.: Питер, 2011. 640 с.
3. Nygaard K. Program development as a social activity // Information processing / Ed. H.-J. Kugler. — North Holland: Elsevier Science Publishers B.V., IFIP, 1986. P. 189–198.
4. Webster's new world dictionary of the American language. — New York, NY, USA: The World Publishing Co., 1960. 1724 p.

5. *Зацман И. М.* Таблица интерфейсов информатики как информационно-компьютерной науки // Научно-техническая информация. Сер. 1: Организация и методика информационной работы, 2014. № 11. С. 1–15.
6. *Rosenbloom P. S.* On computing: The fourth great scientific domain. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2013. 307 p.
7. *Зацман И. М.* Теоретические основания компьютерного образования: среды предметной области информатики как основание классификации ее объектов // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 4. С. 77–89. doi: 10.14357/08696527220408.
8. *Зацман И. М.* О научной парадигме информатики: верхний уровень классификации объектов ее предметной области // Информатика и её применения, 2022. Т. 16. Вып. 4. С. 108–114. doi: 10.14357/19922264220411.
9. *Зацман И. М.* Данные, информация и знание в научной парадигме информатики // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 1. С. 116–125. doi: 10.14357/19922264230115.
10. *Зацман И. М.* Трансформация иерархии Акоффа в научной парадигме информатики // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 3. С. 107–113. doi: 10.14357/19922264230315.
11. *Соломоник А. Б.* Философия знаковых систем и язык. — М.: ЛКИ, 2011. 408 с.
12. *Зацман И. М.* Интерфейсы третьего порядка в информатике // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 3. С. 82–89. doi: 10.14357/19922264190312.
13. *Chen L., Zaharia M., Zou J.* How is ChatGPT's behavior changing over time? — Cornell University, 2023. 23 p. arXiv:2307.09009 [cs.CL].
14. *Зацман И. М.* Кодирование концептов в цифровой среде // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 4. С. 97–106. doi: 10.14357/19922264190416.
15. *Соломоник А. Б.* Опыт современной теории познания. — СПб.: Алетейя, 2019. 232 с.
16. *Solomonick A. B.* The modern theory of cognition. — Newcastle, U.K.: Cambridge Scholars Publishing, 2021. 242 p.
17. *Zatsman I.* Digital spiral model of knowledge creation and encoding its dynamics // 18th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings. — Matera, Italy: Arts for Business Institute, 2023. P. 581–596. https://www.researchgate.net/publication/371303696_Digital_Spiral_Model_of_Knowledge_Creation_and_Encoding_its_Dynamics.
18. *Вакуленко В. В., Зацман И. М.* Формализованное описание статистической обработки информации в базах данных // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 3. С. 93–99. doi: 10.14357/19922264230313.
19. *Кун Т.* Структура научных революций / Пер. с англ. — М.: Прогресс, 1977. 302 с. (*Kuhn T.* The structure of scientific revolutions. — Chicago, IL, USA: University of Chicago Press, 1962. 264 p.).
20. *Зацман И. М.* Система семиотических аксиом информатики как фундаментальной науки // Проблемы и методы информатики: II Научная сессия ИПИ РАН: Тезисы докладов. — М: ИПИ РАН, 2005. С. 42–44.

Поступила в редакцию 10.09.23

SCIENTIFIC PARADIGM OF INFORMATICS: TRANSFORMATION CLASSIFICATION OF DOMAIN OBJECTS

I. M. Zatsman

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

Abstract: A description is given of the first outcomes of creating a classification of transformations of objects of an informatics subject domain as a component of the scientific knowledge system covering a wide range of information and computer sciences. The boundaries of its subject domain which is thus significantly expanded are defined within the framework of Paul Rosenbloom’s concept of polyadic computing. All informatics entities in the paper are divided into two global classes: objects and their transformations. For each such class, in the process of creating the scientific paradigm of informatics, its own classification is constructed and with their formation its creation began. This paper discusses the two top levels of only the classification of transformations of objects of the informatics subject domain. The basis for constructing the highest level is the proposed division of the informatics subject domain into media (mental, sensory, digital, and a number of other media), each of which includes objects of the same nature. At the same time, there are examples of the appearance of previously unused media in the informatics subject domain. Thus, with the creation of information technologies that use brain-computer interfaces, it would be logical to add the neuromedium to the informatics subject domain, and with the development of methods and means for long-term storage of large-volume data using synthesized DNA chains add the DNA-medium. The basis for constructing the next level of classification of object transformations is the Solomonick’s typology of sign systems. The purpose of the paper is to describe, on the one hand, the two top levels of classification of transformations of objects of the informatics subject domain, and on the other hand, the method for generating tables detailing this classification which makes it possible to correlate the categories of object transformations in the tables with the interfaces implemented in computer systems and means. The generated tables include categories of transformations that correspond to both already known interfaces and theoretically possible ones but not yet implemented in computer systems and means.

Keywords: domain objects; transformation of objects; classification; subject domain medium; informatics paradigm

DOI: 10.14357/08696527230412

EDN: ZIKUWO

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. Newell, A., A. Perlis, and H. Simon. 1967. Computer science. *Science* 157(3795):1373–1374.
2. Simonovich, S. V. 2011. *Informatika. Bazovyy kurs* [Computer science. Basic course]. Saint Petersburg: Piter Publishing House. 640 p.
3. Nygaard, K. 1986. Program development as a social activity. *Information processing*. Ed. H.-J. Kugler. North Holland: Elsevier Science Publishers B.V., IFIP. 189–198.
4. Webster's new world dictionary of the American language. 1960. New York, NY: The World Publishing Co. 1724 p.
5. Zatsman, I. 2014. A table of interfaces of informatics as computer and information science. *Scientific Technical Information Processing* 41(4):233–246.
6. Rosenbloom, P. S. 2013. *On computing: The fourth great scientific domain*. Cambridge, MA: MIT Press. 307 p.
7. Zatsman, I. M. 2022. Teoreticheskie osnovaniya komp'yuternogo obrazovaniya: sredi predmetnoy oblasti informatiki kak osnovanie klassifikatsii ee ob'ektov [Theoretical foundations of digital education: Subject domain media of informatics as the base of its objects' classification]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(4):77–89. doi: 10.14357/08696527220408.
8. Zatsman, I. 2022. O nauchnoy paradigme informatiki: verkhniy uroven' klassifikatsii ob'ektov ee predmetnoy oblasti [On the scientific paradigm of informatics: The classification high level of its objects]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 16(4):73–79. doi: 10.14357/19922264220411.
9. Zatsman, I. M. 2023. Dannye, informatsiya i znanie v nauchnoy paradigme informatiki [On the scientific paradigm of informatics: Data, information, and knowledge]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(1):116–125. doi: 10.14357/19922264230115.
10. Zatsman, I. M. 2023. Transformatsiya ierarkhii Akoffa v nauchnoy paradigme informatiki [Transformation of the Ackoff's hierarchy in the scientific paradigm of informatics]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(3):107–113. doi: 10.14357/19922264230315.
11. Solomonick, A. B. 2011. *Filosofiya znakovykh sistem i yazyk* [Philosophy of sign systems and language]. Moscow: LKI. 408 p.
12. Zatsman, I. M. 2019. Interfeysy tret'ego poryadka v informatike [Third-order interfaces in informatics]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(3):82–89. doi: 10.14357/19922264190312.
13. Chen, L., M. Zaharia, and J. Zou. 2023. How is ChatGPT's behavior changing over time? *arXiv.org*. 23 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/2307.09009> (accessed October 23, 2023).
14. Zatsman, I. M. 2019. Kodirovanie kontseptov v tsifrovoy srede [Digital encoding of concepts]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(4):97–106. doi: 10.14357/19922264190416.
15. Solomonick, A. B. 2019. *Opyt sovremennoy teorii poznaniya* [Experience of modern theory of cognition]. Saint Petersburg: Aletheia. 232 p.
16. Solomonick, A. B. 2021. *The modern theory of cognition*. Newcastle, U.K.: Cambridge Scholars Publishing. 242 p.

17. Zatsman, I. 2023. Digital spiral model of knowledge creation and encoding its dynamics. *18th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings*. Matera, Italy: Arts for Business Institute. 581–596. Available at: https://www.researchgate.net/publication/371303696_Digital_Spiral_Model_of_Knowledge_Creation_and_Encoding_its_Dynamics (accessed November 16, 2023).
18. Vakulenko, V. V., and I. M. Zatsman. 2023. Formalizovannoe opisaniye statisticheskoy obrabotki informatsii v bazakh dannykh [Formalized description of statistical information processing in databases]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(3):93–99. doi: 10.14357/19922264230313.
19. Kuhn, T. 1962. *The structure of scientific revolutions*. Chicago, IL: University of Chicago Press. 264 p.
20. Zatsman, I. M. 2005. Sistema semioticheskikh aksiom informatiki kak fundamental'noy nauki [System of semiotic axioms of informatics as a fundamental science]. *Problemy i metody informatiki: II Nauchnaya sessiya IPI RAN. Tezisy dokladov* [Problems and Methods of Informatics: 2nd Scientific Session of the IPI RAS. Abstracts]. Moscow: IPI RAN. 42–44.

Received September 10, 2023

Contributor

Zatsman Igor M. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, head of department, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; izatsman@yandex.ru

ТЕОРИЯ S-СИМВОЛОВ: КЛАССЫ БАЗОВЫХ S-ЗАДАЧ

В. Д. Ильин¹

Аннотация: Теория S-символов представляет собой расширенное обобщение теории S-моделирования. Рассматривается как часть методологического обеспечения разработок систем искусственного интеллекта в S-среде (включая системы знаний, системы S-моделирования задач и конструирования программ и др.). S-среда, основанная на взаимосвязанных системах S-(символов, кодов, сигналов) служит инфраструктурным основанием реализации информационных технологий различного назначения. В статье представлена четвертая, заключительная часть описания теории. Приведено обоснование классов базовых S-задач и определены основные классы: S-(представления, преобразования, распознавания, интерпретации, конструирования, обмена, сохранения, накопления, поиска, информационной защиты и криптографии). Базовыми названы S-задачи, к решению которых редуцируются другие S-задачи. Рассмотрены ключевые S-задачи каждого класса.

Ключевые слова: теория S-символов; S-задача; классы базовых S-задач; S-(представление, преобразование, распознавание, интерпретация, конструирование, обмен, сохранение, накопление, поиск, информационная защита и криптография)

DOI: 10.14357/08696527230413

EDN: YLGBME

1 Введение

В ближайшие годы одно из основных направлений методологического обеспечения развития S-среды будет связано с созданием специфицируемых систем решения S-задач [1–3] на основе *сетевых*² сервисов, реализованных с использованием цифровых двойников [4, 5]. Уже в наши дни скорости передовых технологий беспроводной связи становятся достаточными для решения многих S-задач на основе сетевых сервисов. Прикладная эффективность таких технологий и снижение цен на сетевые сервисы способствуют интенсивному совершенствованию S-среды.

Среди первоочередных проблем развития S-среды: развитие S-(символьных, кодовых и сигнальных) систем; программно-аппаратное преобразование аудио- и тактильных S-сообщений, вводимых (см. *Ввод в информатике*³) человеком (или роботом), в графические, представленные композицией текста, *гипертекс-*

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

²Компьютерная сеть // Энциклопедия Руниверсалис. https://пуни.рф/index.php/Компьютерная_сеть.

³Ильин В. Д. Ввод в информатике // Большая российская энциклопедия (электронная версия). <https://bigenc.ru/c/vvod-v-informatike-ee60c7>.

та¹, специальных символов и изображений; технологическое совершенствование и унификация беспроводных интерфейсов [прежде всего видеointерфейсов (вывод² по выбору пользователя: на специальные очки, экраны монитора, телевизора или другого устройства видеовывода)].

Запись и выделение фрагментов текста. Для записи формул и выделения определений, замечаний и примеров в составе *S-сообщений* используются средства языка *TSM-комплекса* (*TSM: textual symbolic modeling*)³.

TSM имеет средства записи формализованных выражений (без применения редакторов формул), выделения частей *S-сообщений* и замены выбранными сокращениями часто повторяющихся фрагментов. Для выполнения описаний достаточно стандартной клавиатуры и набора средств, имеющих в составе текстовых редакторов пакетов *LibreOffice*, *OpenOffice* или др.

В статье применены следующие *TSM-средства* выделения фрагментов текста:

□ ⟨фрагмент описания⟩ □ ≈ определение (здесь и далее символ ≈ заменяет слово «означает»);

◇ ⟨фрагмент описания⟩ ◇ ≈ замечание;

○ ⟨фрагмент описания⟩ ○ ≈ пример.

Курсивом (и полужирным) выделены первые вхождения названий понятий и фрагменты описания, к которым автор хочет привлечь внимание.

2 Развитие средств автоматизации решений

Даже для краткого обзора средств автоматизации решений на начальном этапе их развития потребовался бы довольно объемный текст. Поэтому выбрана только часть ключевых изобретений, на более подробное описание которых (в онлайн-энциклопедиях и литературных источниках) даны ссылки.

В 1836–1848 гг. британский инженер Ч. Бэббидж⁴ спроектировал механическую десятичную вычислительную машину (названную им *аналитической машиной*). Это был проект механического прототипа будущих вычислительных машин (◇ программа вычислений, данные и результат записывались на перфокартах; автоматическое выполнение программы обеспечивало устройство управления ◇). Проект не был реализован.

В 1934–1938 гг. германский инженер Конрад Цузе⁵ создал *механическую двоичную вычислительную машину* (длина машинного слова — 22 двоичных

¹Ильин В. Д. Гипертекст // Большая российская энциклопедия (электронная версия). <https://bigenc.ru/c/gipertekst-bd30f0>.

²Ильин В. Д. Вывод в информатике // Большая российская энциклопедия (электронная версия). <https://bigenc.ru/c/vyvod-v-informatike-9de0c3>.

³Символьное моделирование (S-моделирование) // Энциклопедия Руниверсалис. [https://руни.рф/index.php/Символьное_моделирование_\(S-моделирование\)](https://руни.рф/index.php/Символьное_моделирование_(S-моделирование)).

⁴Бэббидж, Чарльз // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.рф/index.php/Бэббидж,_Чарлз.

⁵Бобровский С. Изобретатель компьютера // Виртуальный компьютерный музей. <https://www.computer-museum.ru/galglory/2.htm>.

разряда; память — 64 слова; операции с плавающей запятой). Вначале программа и данные вводились вручную. В 1941 г. *К. Цузе* с участием австрийского инженера *Г. Шрайера* была создана (на основе телефонных реле) первая в мире работоспособная двоичная вычислительная машина с программным управлением (*Z3*) [6]. В 1942 г. *К. Цузе* создал также и первую в мире управляющую цифровую вычислительную машину (*S2*), которая использовалась для управления самолетами-снарядами. Первый в мире язык программирования высокого уровня *Планкалкюль*¹ (нем. *Plankalkül* — план исчисления) был создан *К. Цузе* в 1943–1945 гг., а опубликован в 1948 г. ◊ Из-за секретности работ, выполненных *К. Цузе*, об их результатах стало известно только после окончания Второй мировой войны. ◊

В середине XX в. началось производство цифровых вычислительных машин, которые в США и Великобритании были названы компьютерами, а в СССР — электронными вычислительными машинами (ЭВМ). Цифровые электронные вычислительные машины, начиная с американского компьютера *ЭНИАК*² [(*ENIAC* — *Electronic Numerical Integrator and Computer* — электронный числовой интегратор и вычислитель); начало разработки — 1943 г., представлен в 1946 г.], создавались тогда как средства автоматизации математических вычислений.

В СССР в 1948 г. *И. С. Брук*³ совместно с *Б. И. Рамеевым*⁴ составил отчет о принципах действия автоматической цифровой вычислительной машины (АЦВМ). Первое в СССР авторское свидетельство (№ 10475) на изобретение АЦВМ на имя *И. С. Брука* и *Б. И. Рамеева* с приоритетом от 4 декабря 1948 г. выдано 16 февраля 1950 г. [7]. В 1950-е гг. было создано первое поколение отечественных ЭВМ (элементная база — электронные лампы). Двадцать пятого декабря 1951 г. *МЭСМ* (малая электронная счетная машина)⁵, разработанная под руководством *С. А. Лебедева*⁶, была принята в эксплуатацию государственной комиссией. В начале 1952 г. началась эксплуатация ЭВМ *М-1*⁷, разработанной под руководством *И. С. Брука*; в этом же году лабораторией *Брука* разработана машина *М-2*. В апреле 1953 г. была принята Государственной

¹Планкалкюль // Энциклопедия Руниверсалис. <https://руни.рф/index.php/Планкалкюль>.

²ЭНИАК // Энциклопедия Руниверсалис. <https://руни.рф/index.php/ЭНИАК>.

³Член-корреспондент АН СССР Исаак Семенович Брук // Виртуальный компьютерный музей. <https://www.computer-museum.ru/galglory/17.htm>.

⁴Башир Искандарович Рамеев // Виртуальный компьютерный музей. <https://www.computer-museum.ru/galglory/8.htm>.

⁵*Дашевский Л. Н., Шкабара Е. А.* Как это начиналось (воспоминания о создании первой отечественной электронной вычислительной машины — МЭСМ). — М.: Знание, 1981. 64 с. https://www.computer-museum.ru/books/kak_eto_nachinalos.pdf.

⁶*Лисовский И. М.* Сергей Алексеевич Лебедев — создатель первой в континентальной Европе и в Советском Союзе цифровой электронной вычислительной машины (МЭСМ) // Виртуальный компьютерный музей. https://www.computer-museum.ru/histussr/lebedev_mesm.htm.

⁷АЦВМ М-1 // Виртуальный компьютерный музей. <https://www.computer-museum.ru/books/m1-m13/acvm-m1.htm>.

комиссией БЭСМ-1¹ (серия ЭВМ БЭСМ — больших электронных счетных машин), разработанная в ИТМ и ВТ под руководством С. А. Лебедева. В 1953 г. начался выпуск ЭВМ «Стрела»² (главный конструктор — Ю. Я. Базилевский, заместитель главного конструктора — Б. И. Рамеев). В 1955 г. была выпущена ЭВМ «Урал-1» из семейства «Урал»³ цифровых ЭВМ общего назначения (главный конструктор Б. И. Рамеев).

С начавшимся в 1970-х гг. ростом доступности S-машин [1, 2] для пользователей из различных областей деятельности наблюдается убывание доли математических задач, решаемых с помощью S-машин, и рост доли нематематических задач. Когда во второй половине 1960-х гг. стали производиться компьютерные терминалы с экранами, начались разработки программ экранных редакторов, предназначенных для ввода, сохранения и коррекции текста с отображением его на полном экране. Одним из первых экранных редакторов стал O26, созданный в 1967 г. для операторов консоли компьютеров серии CDC 6000. В 1970 г. был разработан vi — стандартный экранный редактор для ОС Юникс (Unix) и Линукс (Linux). ◊ Применение экранных редакторов не только увеличило производительность труда программистов, но и создало предпосылки для существенных перемен в инструментарии автоматизированного построения S-моделей произвольных объектов. ○ Использование экранных редакторов для формирования текстов различного назначения (научных статей и книг, учебных пособий и др.) уже в 1970-е гг. позволило значительно увеличить производительность создания информационных ресурсов⁴. ○ ◊

◊ К середине 1970-х гг. совершился поворот в подходе к построению и применению S-машин: от средств автоматизации в основном математических вычислений к средствам решения задач из различных областей деятельности. ○ В 1984 г. компания Kurzweil Music Systems (KMS), созданная американским изобретателем Реймондом Курцвейлом, произвела цифровой музыкальный синтезатор Kurzweil 250⁵. Он стал первым в мире специализированным компьютером, который жестовые S-символы, вводимые с клавиатуры, преобразовывал в музыкальные звуки (аудио S-символы) [1]. ○ ◊

В 1962 г. был опубликован доклад о человеко-машинном взаимодействии в режиме онлайн [8]. В докладе содержалось обоснование целесообразности построения глобальной сети как инфраструктурной платформы, обеспечивающей

¹Машина электронная вычислительная общего назначения БЭСМ-1 // Виртуальный компьютерный музей. <https://www.computer-museum.ru/histussr/29-3.htm>.

²ЭВМ «Стрела» // Виртуальный компьютерный музей. <https://www.computer-museum.ru/histussr/18.htm>.

³ЭЦВМ «Урал-1» // Виртуальный компьютерный музей. <https://www.computer-museum.ru/histussr/ural1.htm>.

⁴Информационные ресурсы // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.рф/index.php/Информационные_ресурсы.

⁵Ellis D. Kurzweil 250. Digital keyboard. <https://www.muzines.co.uk/articles/kurzweil-250/8026>.

доступ к информационным ресурсам, размещенным на компьютерах, подключенных к этой сети. Теоретическое обоснование *пакетной коммутации* при передаче сообщений в компьютерных сетях было дано в опубликованной в 1961 г. статье американского исследователя *Л. Клейнрока*¹. В 1971 г. *Р. Томлинсон*² (США) изобрел электронную почту, в 1972 г. этот сервис был реализован. Ключевым событием в истории *интернета* стало изобретение в 1973 г. американскими инженерами *В. Серфом*³ и *Р. Каном*⁴ протокола управления передачей — *TCP*⁵ [9]. В 1983 г. семейство протоколов *TCP/IP* было стандартизовано. В 1984 г. была создана система доменных имен (DNS — Domain Name System); в 1988 г. — протокол *чата* [*интернет-сервиса обмена текстовыми сообщениями в реальном времени (IRC — Internet Relay Chat)*]. В 1989 г. реализован проект *веба*⁶, предложенный и выполненный под руководством британского исследователя *Т. Бернерса-Ли*⁷.

Высокому темпу развития интернета способствует то, что со времени его зарождения профессионалы без задержек обмениваются идеями и решениями, используя возможности интернета, ставшего инфраструктурной платформой S-среды решения задач [1, 2]. Начиная с 2000-х гг. интенсивно растет число интеллектуальных интернет-решений, воплощающих концепцию *интернета вещей (The Internet of Things)*⁸.

3 Основные классы базовых S-задач

В *теории S-символов* на основании изучения назначения и свойств различных S-задач, решаемых с помощью S-машин, определены основные *классы базовых S-задач*.

□ **S-задача** $\approx \{Formul, Rulsys, Alg, Prog\}$, где *Formul* — постановка S-задачи; *Rulsys* — множество систем *обязательных* и *ориентирующих требований к решению S-задачи*, поставленных в соответствии *Formul*; *Alg* — объединение множеств алгоритмов, каждое из которых соответствует одному

¹Клейнрок, Леонард // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.пф/index.php/Клейнрок_Леонард.

²Томлинсон, Рэй // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.пф/index.php/Томлинсон_Рэй.

³Серф, Винтон // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.пф/index.php/Серф_Винтон.

⁴Кан, Роберт Эллиот // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.пф/index.php/Кан_Роберт_Эллиот.

⁵Transmission Control Protocol // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.пф/index.php/Transmission_Control_Protocol.

⁶Всемирная паутина // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.пф/index.php/Всемирная_паутина.

⁷Бернерс-Ли, Тим // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.пф/index.php/Бернерс-Ли_Тим.

⁸Интернет вещей // Энциклопедия Руниверсалис. https://руни.пф/index.php/Интернет_вещей.

элементу из $Rulsys$; $Prog$ — объединение множеств S -программ, каждое из которых поставлено в соответствие одному из элементов Alg . Постановка S -задачи $Formul \approx \{Mem, Rel\}$, где Mem — множество понятий задачи, на котором задано разбиение $Mem = Inp \cup Out (Inp \cap Out = 0)$ и совокупность Rel связей между понятиями, определяющая бинарное отношение $Rel < Inp * Out$. Множество Mem называем *памятью задачи*, а Inp и Out — ее *входом* и *выходом*, значения которых предполагается соответственно задавать и искать. \square

В общем случае множества $Rulsys$, Alg и $Prog$ могут быть пустыми: число их элементов зависит от степени изученности S -задачи. Для каждого элемента из $Rulsys$, Alg и $Prog$ задано описание применения. Описания применения элементов $Rulsys$ включают спецификацию типа *решателя задачи*, требование к информационной безопасности и др. Описания применения элементов из Alg включают данные о допустимых режимах работы решателя S -задачи, о требованиях к полученному результату и др. Описания применения S -программ включают данные о языках программирования, операционных системах и др. [2].

3.1 S-представление

\square *Представление произвольных S-объектов, рассчитанных на восприятие человеком и S-машинами, связано с изобретением языков S-сообщений*, удовлетворяющих определенным требованиям. В этом классе изучаются: *системы S-символов, S-кодов и S-сигналов*, используемые соответственно в человеко- и S-машинно-ориентированных языках (\odot к первым относим языки спецификации, программирования и запросов; ко вторым — системы S-машинных команд \odot); системы адресации, *S-задачи представления S-(команд и данных)* (\odot включая разрядность \odot).

К этому классу отнесены также *S-задачи представления S-моделей систем понятий*, на которых интерпретируются S-сообщения. На верхнем уровне S-задачной иерархии этого класса находится *представление S-моделей систем знаний* [1, 2]. \square

3.2 S-преобразование

\square *Преобразование типов и форм представления S-объектов* позволяет устанавливать соответствия между ними. *S-задачи преобразования типов* (\odot речевого в текстовый и обратно и др. \odot) и *форм* (\odot аналоговой в цифровую и обратно; несжатой в сжатую и обратно \odot); одной формы представления документа в другую (\odot *.doc в *.pdf \odot) — необходимое дополнение к *S-задачам представления* [1, 2]. \square

3.3 S-распознавание

\square *Распознавание S-объекта* предполагает необходимость его представления в формате, известном получателю. При выполнении этого условия для

распознавания S-объекта решаются S-задачи сопоставления с S-объектами, принадлежащими множеству «образцов», либо задачи сопоставления свойств распознаваемого S-объекта со свойствами «образцов» [1, 2]. □

3.4 S-конструирование

□ *Построение по определенным правилам из ранее созданных S-объектов более сложных S-объектов с заданными свойствами* [○ S-(задач, алгоритмов, программ) [10], S-(чипсетов, машин, кластеров¹, сетей, сервисов и др. ○)]. К этому классу отнесены S-задачи конструирования S-моделей систем понятий, языков, систем знаний, интерпретаторов S-сообщений на S-моделях систем понятий; S-сообщений и средств их построения, документов и информационных ресурсов; документооборота и систем информационных ресурсов. На верхнем уровне иерархии этого класса находятся S-задачи конструирования S-среды [1, 2]. □

3.5 S-интерпретация

□ *Интерпретация S-сообщений* предполагает существование принятого S-общения, S-модели системы понятий, на которой оно должно интерпретироваться, и механизма S-интерпретации (○ для микропроцессоров S-машин S-сообщениями, подлежащими интерпретации, служат S-коды S-машинных команд и данных ○) [1, 2]. □

3.6 S-обмен

□ В этом классе изучаются S-задачи взаимодействия в S-среде (человек–S-машина; S-машина–S-машина) с типизацией: отправителей и получателей; средств отправки, передачи и получения S-сообщений; сред передачи S-сообщений. Изобретаются системы правил обмена S-сообщениями (S-сетевые протоколы); архитектуры S-сетей, сервис-ориентированные архитектуры; системы электронного документооборота и системы информационных ресурсов [1, 2]. □

3.7 S-(сохранение, накопление и поиск)

□ Этот класс включает связанные между собой S-задачи (сохранения, накопления и поиска). Изучаются и типизируются: память S-машин и S-машинные накопители, механизмы управления ими, формы сохранения и накопления; S-машинные носители, методы сохранения, накопления и поиска; базы данных и библиотеки программ. Изучаются S-модели предмета поиска (по образцу, по признакам, по описанию свойств) и методов поиска [1, 2]. □

¹Ильин В. Д. Кластер в информатике // Большая российская энциклопедия (электронная версия). <https://bigenc.ru/c/klaster-v-informatike>.

3.8 S-(информационная защита и криптография)

□ S-задачи этого класса включают: предотвращение и обнаружение уязвимостей *систем информационной защиты*; *контроль доступа* к информационным ресурсам, аппаратным и программным средствам S-машин; защиту от вторжений, *вредоносных программ*¹, перехвата S-сообщений и несанкционированного применения аппаратных и программных средств S-машин [1, 2]. □

4 Заключение

Представлена четвертая, заключительная часть *теории S-символов* (расширенного обобщения *теории S-моделирования* [11]). Теория S-символов рассматривается как часть методологического обеспечения разработок систем искусственного интеллекта (○ систем знаний, систем автоматизации программирования и др. ○) в цифровой среде. Предложена классификация базовых S-задач, к решению которых редуцируются другие S-задачи, решаемые в S-среде.

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.
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.
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.
4. Semeraro C., Lezocche 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.
5. 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.
6. Zuse K. Der Computer — Mein Lebenswerk. — Berlin–Heidelberg: Springer, 1993. 236 p. doi: 10.1007/978-3-642-12096-1.
7. Захаров В. Н. Две судьбы в истории отечественной вычислительной техники (С. А. Лебедев и И. С. Брук) // Развитие вычислительной техники в России и странах бывшего СССР: история и перспективы / Под ред. А. Н. Томилина. — М.: РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2017. С. 58–62.
8. Licklider J. C. R., Clark W. E. On-line man-computer communication // AIEEE-IRE Spring Joint Computer Conference Proceedings. — New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1962. P. 113–128. doi: 10.1145/1460833.1460847.
9. Cerf V., Kahn R. A protocol for packet network intercommunication // IEEE T. Commun., 1974. Vol. 22. No. 5. P. 637–648.

¹Ильин В. Д. Компьютерный вирус // Большая российская энциклопедия (электронная версия). <https://bigenc.ru/c/komp-iuternyi-virus-a3244b>.

10. 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.
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.

Поступила в редакцию 07.08.23

THEORY OF S-SYMBOLS: THE CLASSES OF BASIC S-PROBLEMS

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 theory of S-symbols is an extended generalization of the theory of S-modeling. It is considered as a part of the methodological support for the development of artificial intelligence systems in the S-environment (including knowledge systems, systems of S-modeling of problems and program design, etc.). The S-environment based on interconnected systems of S-(symbols, codes, signals) serves as the infrastructural basis for the implementation of information technologies for various purposes. The article presents the fourth part (out of four) of the theory. The substantiation of the classes of basic S-problems is given and the main classes are defined: S-(representations, transformations, recognition, interpretation, construction, exchange, preservation, accumulation, search, information protection and cryptography). The S-problems to which other S-problems are reduced are called basic S-problem. The key S-problems of each class are considered.

Keywords: theory of S-symbols; S-problem; classes of basic S-problems; S-(representations, transformations, recognition, interpretation, construction, exchange, preservation, accumulation, search, information protection and cryptography)

DOI: 10.14357/08696527230413

EDN: YLGBME

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.
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.

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.
4. 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.
5. 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.
6. Zuse, K. 1993. *Der Computer — Mein Lebenswerk*. Berlin–Heidelberg: Springer. 236 p. doi: 10.1007/978-3-642-12096-1.
7. Zakharov, V. N. 2017. Dve sud'by v istorii otechestvennoy vychislitel'noy tekhniki (S. A. Lebedev i I. S. Brook) [Two destinies in the history of Russian computer technology (S. A. Lebedev and I. S. Brook)]. *Razvitie vychislitel'noy tekhniki v Rossii i stranakh byvshego SSSR: istoriya i perspektivy* [Computer technology in Russia and in the former Soviet Union]. Ed. A. N. Tomilin. Moscow: G. V. Plekhanov Russian University of Economics Publs. 58–62.
8. Licklider, J. C. R., and W. E. Clark. 1962. On-line man–computer communication. *AIEE-IRE Spring Joint Computer Conference Proceedings*. New York, NY: Association for Computing Machinery. 113–128. doi: 10.1145/1460833.1460847.
9. Cerf, V. and R. Kahn. 1974. A protocol for packet network intercommunication. *IEEE T. Commun.* 22(5):637–648. doi: 10.1109/TCOM.1974.1092259.
10. 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.
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.

Received August 7, 2023

Contributor

Ilyin Vladimir D. (b. 1937) — Doctor of Science in technology, professor, leading 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

НЕСБАЛАНСИРОВАННОСТЬ КЛАССОВ В ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ КОНКРЕТНО-ИСТОРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И. М. Адамович¹, О. И. Волков²

Аннотация: Статья продолжает серию работ, посвященных технологии поддержки конкретно-исторических исследований (ПКИИ), построенной на принципах сотворчества и краудсорсинга и ориентированной на широкий круг не относящихся к профессиональным историкам и биографам пользователей. Статья посвящена дальнейшему развитию темы подготовки данных для применяемых в технологии алгоритмов машинного обучения. Показана особая важность бинарной классификации для конкретно-исторического исследования. Описана проблема дисбаланса классов при проведении бинарной классификации с помощью алгоритмов машинного обучения и ее последствия. Показано, что конкретно-исторические данные могут быть сильно несбалансированными. Приведен обзор подходов к решению задачи устранения дисбаланса классов. Проведен анализ специфики конкретно-исторических данных, на его основе выбран подход oversampling как наиболее подходящий для технологии. Описаны алгоритмы, реализующие данный подход, оценены их достоинства и недостатки. Выбран алгоритм ADASYN как наиболее перспективный для использования в условиях технологии. Оценены возможности уже включенных в технологию средств борьбы с шумами в данных и выбросами для компенсации такого недостатка алгоритма ADASYN, как чувствительность к выбросам.

Ключевые слова: конкретно-историческое исследование; распределенная технология; машинное обучение; дисбаланс классов; алгоритм ADASYN

DOI: 10.14357/08696527230414

EDN: YDVCYC

1 Введение

Поддержка конкретно-исторических исследований стала одной из актуальных задач современности, что обусловлено вовлечением в исследовательский процесс не только членов профессионального исторического сообщества, но и самых широких слоев непрофессионалов в связи со все возрастающим интересом к частной, семейной истории [1].

В [2, 3] описана разработанная в ФИЦ ИУ РАН распределенная технология ПКИИ, основанная на принципах краудсорсинга (мобилизации ресурсов ши-

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

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Volkov@amsd.com

рокого круга добровольцев посредством информационных технологий). Данные в этой технологии организованы в форме семантической сети. Узлы сети представляют собой именованные универсальные классы объектов. Факты задаются значениями экземпляров классов и связями между ними. Связи наследуются из сети классов [4].

В конкретно-исторических исследованиях применяются следующие методы и приемы работы с данными [5]:

- извлечение и группировка изучаемых объектов; сравнение групп объектов; получение сводных данных об изучаемых группах объектов;
- классификация изучаемых объектов;
- формирование хронологических рядов; периодизация (деление процессов развития на отличающиеся друг от друга периоды).

В [6] показано, что подобные задачи целесообразно решать в рамках технологии ПКИИ, в том числе с применением методов машинного обучения. Особое внимание обращено на процедуру очистки данных (data cleansing, data cleaning, data scrubbing или data wrangling), к которой относятся [7]:

- заполнение пропущенных значений;
- сглаживание зашумленных данных;
- устранение несогласованности;
- удаление выбросов.

В [6] также показана особая важность подготовки данных для задач машинного обучения в рамках технологии ПКИИ в связи с фрагментарностью и противоречивостью конкретно-исторической информации. Описана специфика очистки конкретно-исторических данных и проведен анализ возможности применения с этой целью механизмов и алгоритмов, уже интегрированных в технологию. Перечислены основные направления, по которым проводится очистка данных. Для каждого направления выявлены подходящие инструменты, уже включенные в технологию.

Данная статья посвящена дальнейшему развитию технологии ПКИИ в области подготовки данных для задач, связанных с машинным обучением.

2 Дисбаланс классов

В [8] показана значимость классификации и типологизации, которая по форме представляет собой разновидность классификации, лежащих в основе историко-типологического метода исторического познания.

Особую важность в конкретно-историческом исследовании имеет бинарная классификация, поскольку она соответствует подтверждению или отбрасыванию

гипотезы, возникшей в процессе исследования относительно объекта исследования. Например, если историческое исследование посвящено отношению российских дворян к советской власти, то одно из возможных дихотомических делений в соответствии с [9] может выглядеть следующим образом:

Русские дворяне с 1917 г.:

1. Приняли светскую власть.
 - 1.1. Участвовали в гражданской войне.
 - 1.1.1. Погибли.
 - 1.1.2. Не погибли.
 - 1.2. Не участвовали в гражданской войне.
2. Не приняли светскую власть.
 - 2.1. Участвовали в гражданской войне.
 - 2.1.1. Погибли.
 - 2.1.2. Не погибли.
 - 2.1.2.1. Эмигрировали.
 - 2.1.2.2. Остались.
 - 2.2. Не участвовали в гражданской войне.
 - 2.2.1. Эмигрировали.
 - 2.2.2. Остались.

Но в задачах классификации данным присущи дополнительные проблемы помимо описанных выше проблем очистки данных. В задаче бинарной классификации данные называются несбалансированными (Imbalanced Data), если большинство объектов исходного набора данных принадлежат одному классу (мажоритарный класс) и гораздо меньшее число объектов относится к другому классу (миноритарный класс). При этом неверная классификация примеров миноритарного класса, как правило, обходится в разы дороже, чем ошибочная классификация примера мажоритарного класса, так как экземпляры миноритарного класса представляют собой редкие, но наиболее важные данные в реально используемых наборах данных [10]. Несбалансированность классов считается сильной, когда классы в выборке представлены в соотношении более чем 10 : 1. При обучении модели на сильно несбалансированных данных алгоритм классификации может посчитать примеры интересующего миноритарного класса шумом и пропустить их [11].

Специфика конкретно-исторических данных состоит в том, что они охватывают самые разные аспекты жизни и обладают большой неоднородностью. Например, согласно переписи 1897 г., все население страны, а это 125 млн человек, распределялось на следующие сословия: дворяне — 1,5% всего населения; духовенство — 0,5%; купцы — 0,3%; мещане — 10,6%; крестьяне — 77,1%;

казаки — 2,3%. А в годы революции и гражданской войны интеллигенция составляла около 2,5% по отношению ко всему населению [12]. Как видно из приведенных примеров, проблема сильного дисбаланса классов в полной мере присуща конкретно-историческим данным и, используя методы машинного обучения при решении задач классификации, следует принимать меры по ее решению.

3 Подходы к устранению дисбаланса классов

Можно выделить три основных подхода к решению указанной проблемы [11].

1. Первый подход связан с изменением распределения классов в выборке. Эта задача решается с помощью определенного отбора, т. е. семплинга (sampling), примеров из выборки таким образом, чтобы соотношение числа примеров в классах соответствовало заданным требованиям.
2. Ко второму подходу относятся все методы распределения весов. Этот принцип основан на присвоении каждому классу числового параметра — веса, который соответствует штрафу за неверную классификацию. Вес определяется экспертной оценкой либо исходя из распределения классов в обучающей выборке. Этот подход нельзя считать абсолютно универсальным, поскольку он опирается на поддержку весов классов алгоритмами. Например, популярная библиотека `sklearn` предусматривает аргумент `class_weight` только для алгоритмов решающего дерева, случайного леса и логистической регрессии.
3. В третьем подходе примеры миноритарного класса считаются исключительными и классификация строится в рамках задачи обнаружения аномалий. Этот подход применяется, когда объектов миноритарного класса в обучении крайне мало, например 1–3 на 1 млн объектов (а такие задачи бывают, например, когда позитивный класс — катастрофы или большие экономические кризисы) [13], что не соответствует специфике конкретно-исторических данных, как видно из приведенных выше примеров.

На практике часто используется идея семплинга (первый подход) ввиду ее простоты и разнообразия. В этом случае применяют либо добавление в обучающую выборку примеров миноритарного класса (oversampling), либо удаление из нее примеров мажоритарного класса (undersampling) с целью достичь сбалансированного распределения.

4 Алгоритмы генерации примеров

Поскольку конкретно-исторические данные обладают свойством фрагментарности, а их поиск становится наиболее трудоемким этапом исследования [14], концепция удаления данных не соответствует специфике конкретно-исторического исследования, и для целей технологии ПКИИ следует рассматривать

варианты, связанные с генерацией примеров миноритарного класса (oversampling). Поскольку применение oversampling может привести к переобучению [15], при выборе конкретного алгоритма машинного обучения потребуются дополнительные меры по устранению данного недостатка с учетом специфики конкретно-исторических данных. В частности, из принципиальной ограниченности объема этих данных вытекает необходимость использования простых моделей, поскольку сложные модели более склонны к переобучению на ограниченных выборках. И для этих моделей потребуется поиск баланса предикторов и размера выборки, поскольку переобучение вероятно даже для простых моделей, если подать на вход модели избыточное число предикторов.

К наиболее популярным алгоритмам oversampling относятся [16]:

- (1) случайная наивная выборка.

Самый простой способ увеличить число примеров миноритарного класса — случайным образом выбрать наблюдения из него и добавить их в общий набор данных, пока не будет достигнут необходимый баланс между миноритарным и мажоритарным классами. К достоинствам такого подхода относятся его простота, легкость реализации и предоставляемая им возможность изменить баланс в любую нужную сторону. Такой подход к восстановлению баланса не всегда эффективен, поэтому был предложен следующий метод увеличения числа примеров миноритарного класса;

- (2) алгоритм SMOTE.

Алгоритм SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) [17] синтезирует элементы миноритарного класса в непосредственной близости от уже существующих элементов. Алгоритм находит разность между данным элементом x_i и его ближайшим соседом \hat{x}_i , выбранным случайно из группы K ближайших соседей, найденным с помощью алгоритма k -NN (k -nearest neighbors algorithm). Эта разность умножается на случайное число δ в интервале от 0 до 1. Полученное значение добавляется к данному образцу для формирования нового синтезированного образца x_{new} в пространстве признаков:

$$x_{\text{new}} = x_i + (\hat{x}_i - x_i) \delta.$$

Подобные действия продолжаются со следующим соседом до заданного пользователем числа образцов. Существует ряд модификаций этого алгоритма.

Алгоритм SMOTE решает многие проблемы, которые присущи методу случайной наивной выборки, но имеет и свои недостатки, главный из которых — игнорирование мажоритарного класса. Это может проявиться в том, что при сильно разреженном распределении объектов миноритарного класса относительно мажоритарного набора данных «смешаются», т. е. расположатся в таком виде, что отделить объекты одного класса от другого станет очень трудно. Такая ситуация в условиях технологии ПККИ вполне

возможна из за принципиальной фрагментарности конкретно-исторических данных. В качестве решения этой проблемы был предложен третий метод;

(3) алгоритм ADASYN.

Основная особенность алгоритма ADASYN (Adaptive Synthetic Sampling) [18] заключается в том, что он использует специальный механизм для автоматического определения числа синтетических образцов, которые должен сгенерировать каждый элемент миноритарного класса обучающей выборки, вместо того чтобы синтезировать одинаковое число образцов для каждого элемента миноритарного класса, как SMOTE. Пусть имеется выборка, содержащая m наблюдений x_i , $i = 1, \dots, m$. Алгоритм выполняется в соответствии со следующими шагами:

- (а) для заданной пропорции классов вычисляется общее число синтезируемых элементов

$$G = (S_{\text{maj}} - S_{\text{min}}) \beta,$$

где S_{maj} и S_{min} — число наблюдений в мажоритарном и миноритарном классах соответственно; $\beta \in [0, 1]$ — уровень баланса выборки. Если $\beta = 1$, то после синтеза выборка станет полностью сбалансированной;

- (б) для каждого наблюдения x_i из миноритарного класса с помощью алгоритма k -NN выявляются ее K ближайших соседей и вычисляется отношение $r_i = \Delta_i / K$, где Δ_i — число элементов мажоритарного класса среди ближайших K соседей x_i , т. е. $r_i \in [0, 1]$;

- (в) проводится нормирование r_i в соответствии с выражением

$$\hat{r}_i = \frac{r_i}{\sum_{j=1}^m r_j};$$

- (г) определяется число g_i искусственных элементов, которые должны быть синтезированы для каждого наблюдения x_i из миноритарного класса

$$g_i = \hat{r}_i G;$$

- (д) проводится генерация в соответствии с алгоритмом SMOTE.

Основная идея алгоритма ADASYN состоит в том, что он использует \hat{r}_i для определения числа элементов, которые должны быть синтезированы для каждого элемента миноритарного класса. Это эквивалентно присвоению весовых коэффициентов. Чем больше окружающих элементов мажоритарного класса, тем выше вес.

Недостаток ADASYN заключается в том, что на него легко влияют выбросы. Если все K ближайших соседей элемента миноритарного класса окажутся

элементами мажоритарного класса, его вес станет довольно большим и вокруг него будет сгенерировано больше искусственных наблюдений [19]. Из принципиальной неоднородности конкретно-исторических данных следует, что такая ситуация в условиях технологии ПККИИ вполне возможна. При этом выбросы могут быть как ошибочными данными в связи с обилием недостоверной и искаженной информации, так и реальными данными с крайне редкими сочетаниями признаков. В [6] показано, что технология ПККИИ уже имеет в своем составе средства борьбы с шумами в данных и выбросами, включенные в технологию в рамках механизма выявления аномалий в конкретно-исторических данных [20]. Поэтому алгоритм ADASYN представляется более перспективным для использования в технологии.

5 Выводы

Как показано выше, методы классификации и типологизации активно применяются в историческом исследовании. Особую значимость в конкретно-историческом исследовании имеет бинарная классификация. Ее выполнение в технологии ПККИИ может осуществляться с применением алгоритмов машинного обучения. Этап подготовки данных для этих алгоритмов помимо очистки данных должен включать устранение дисбаланса классов, поскольку проблема сильного дисбаланса классов в полной мере присуща конкретно-историческим данным, а при обучении модели на сильно несбалансированных данных алгоритм классификации может посчитать примеры интересующего миноритарного класса шумом и пропустить их. Анализ методов устранения дисбаланса классов в условиях технологии ПККИИ показал потенциальную эффективность для этой цели алгоритма ADASYN в сочетании с включенными в технологию средствами борьбы с шумами в данных и выбросами.

Актуальность дальнейшего развития технологии ПККИИ, ориентированной на широкий круг не относящихся к профессиональным историкам и биографам пользователей, вытекает из все возрастающего общественного интереса к частной, семейной истории.

Литература

1. Грибач С. В. Исследование семейных кризисов посредством психолингвистического эксперимента // Сборники конф. НИЦ Социосфера, 2010. № 6. С. 45–54.
2. Адамович И. М., Волков О. И. Технология распределенного автоматизированного анализа исторических текстов // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 148–161. doi: 10.14357/08696527160311.
3. Адамович И. М., Волков О. И. Единая технология поддержки конкретно-исторических исследований // Системы и средства информатики, 2019. Т. 29. № 1. С. 194–205. doi: 10.14357/08696527190116.

4. Адамович И. М., Волков О. И. Принципы организации данных для технологии поддержки конкретно-исторических исследований // Системы и средства информатики, 2019. Т. 29. № 2. С. 161–171. doi: 10.14357/08696527190214.
5. Гагарина Д. А., Корниенко С. И., Поврозник Н. Г. Информационные системы в цифровой среде исторической науки // История, 2017. Т. 7. Вып. 7(51). 12 с.
6. Адамович И. М., Волков О. И. Очистка данных в технологии поддержки конкретно-исторических исследований // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 3. С. 149–160. doi: 10.14357/08696527230313.
7. Osborne J. W. Best practices in data cleaning: A complete guide to everything you need to do before and after collecting your data. — Newbury Park, CA, USA: SAGE Publications Inc., 2012. 275 p.
8. Мартюшов Л. Н. Методы исторического исследования. — Екатеринбург: УрГПУ, 2016. 86 с.
9. Бочаров А. В. Алгоритмы использования основных научных методов в конкретно-историческом исследовании. — Томск: ТГУ, 2007. 137 с.
10. Клюева И. А. Исследование применимости SMOTE-алгоритма при классификации несбалансированных данных // Современные технологии в науке и образовании: Сб. трудов II Междунар. научн.-технич. и научн.-методической конф. / Под ред. О. В. Миловозова. — Рязань: РГРТУ, 2017. Т. 1. С. 143–146. EDN: ZCKRHN.
11. Найденов А. С. Применение сэмплинга в условиях несбалансированности классов // Информационные технологии: Межвузовский сборник научных трудов. — Рязань: РГРТУ, 2017. С. 73–75. EDN: ZQUNVJ.
12. Фёдоров А. Н. Реальная опора советской власти: социально-демографические характеристики городского населения России в 1917–1920 годах (на материалах Центрального промышленного района) // Ж. исследований социальной политики, 2010. Т. 8. № 1. С. 69–86. EDN: LDFPAF.
13. Дьяконов А. Г. Дисбаланс классов // Анализ малых данных, 2021. <https://alexanderdyakonov.wordpress.com/2021/05/27/imbalance>.
14. Адамович И. М., Волков О. И. Иерархическая форма представления биографического факта // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 2. С. 108–122. doi: 10.14357/08696527160207.
15. Japkowicz N., Stephen S. The class imbalance problem: A systematic study // Intell. Data Anal., 2002. Vol. 6. Iss. 5. P. 429–449.
16. Севастьянов Л. А., Щетинин Е. Ю. О методах повышения точности многоклассовой классификации на несбалансированных данных // Информатика и её применения, 2020. Т. 14. Вып. 1. С. 63–70. doi: 10.14357/19922264200109.
17. Chawla N. V., Bowyer K. W., Hall L. O., Kegelmeyer W. P. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique // J. Artif. Intell. Res., 2002. Vol. 16. P. 321–357. doi: 10.1613/jair.953.
18. He H., Bai Ya., Garcia E. A., Li Sh. ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning // IEEE Joint Conference (International) on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence). — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008. P. 1322–1328. doi: 10.1109/IJCNN.2008.4633969.
19. Category imbalance problems of machine learning (3) — sampling method // Cnblogs.com: Massquantity blog, 2018. <https://www.cnblogs.com/massquantity/p/9382710.html>.

20. *Адамович И. М., Волков О. И.* Алгоритмы кластеризации для технологии поддержки конкретно-исторических исследований // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 4. С. 112–123. doi: 10.14357/08696527220411.

Поступила в редакцию 20.07.23

CLASS IMBALANCE IN THE TECHNOLOGY OF CONCRETE HISTORICAL INVESTIGATION SUPPORT

I. M. Adamovich and O. I. Volkov

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

Abstract: The article continues a series of works devoted to the technology of concrete historical investigation support, built on the principles of co-creation and crowdsourcing and designed for a wide range of nonprofessional historians and biographers users. The article is devoted to the further development of the topic of data preparation for machine learning algorithms used in the technology. The special importance of binary classification for concrete historical research is shown. The problem of class imbalance in binary classification using machine learning algorithms and its consequences are described. It is shown that concrete historical data can be highly imbalanced. An overview of approaches to solving the problem of class imbalance elimination is given. The analysis of the specifics of concrete historical data was carried out, and on its basis, the oversampling approach was chosen as the most suitable for the technology. Algorithms implementing this approach are described; their advantages and disadvantages are evaluated. The ADASYN algorithm has been selected as the most promising for use in the technology conditions. The possibilities of the already included in the technology means of data noise and outliers control to compensate such a disadvantage of the ADASYN algorithm as sensitivity to outliers are evaluated.

Keywords: concrete historical investigation; distributed technology; machine learning; class imbalance; ADASYN algorithm

DOI: 10.14357/08696527230414

EDN: YDVCYC

References

1. Gribach, S. V. 2010. Issledovanie semeynykh krizisov posredstvom psikholingvisticheskogo eksperimenta [The study of family crises through a psycholinguistic experiment]. *Sborniki konf. NITs Sotsiosfera* [Conference Proceedings NIC Sociosfera] 6:45–54.
2. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2016. Tekhnologiya raspredelennogo avtomatizirovannogo analiza istoricheskikh tekstov [The distributed automated technology of historical texts analysis]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):148–161. doi: 10.14357/08696527160311.

3. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2019. Edinaya tekhnologiya podderzhki konkretno-istoricheskikh issledovaniy [Unified technology of concrete historical research support]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 29(1):194–205. doi: 10.14357/08696527190116.
4. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2019. Printsipy organizatsii dannykh dlya tekhnologii podderzhki konkretno-istoricheskikh issledovaniy [The principles of data organization for the technology of concrete historical research support]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 29(2):161–171. doi: 10.14357/08696527190214.
5. Gagarina, D. A., S. I. Korniyenko, and N. G. Povroznik. 2017. Informatsionnye sistemy v tsifrovoy srede istoricheskoy nauki [Information systems in the digital environment of historical studies]. *Istoriya [Hystory]* 7(51). 12 p. Available at: <https://history.jes.su/s207987840001638-0-1/> (accessed October 16, 2023).
6. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2023. Ochistka dannykh v tekhnologii podderzhki konkretno-istoricheskikh issledovaniy [Data cleansing in the technology of concrete historical investigation support]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(3):149–160. doi: 10.14357/08696527230313.
7. Osborne, J. W. 2012. *Best practices in data cleaning: A complete guide to everything you need to do before and after collecting your data*. Newbury Park, CA: SAGE Publications Inc. 275 p.
8. Martyushov, L. N. 2016. *Metody istoricheskogo issledovaniya* [Methods of historical research]. Ekaterinburg: USPU. 86 p.
9. Bocharov, A. V. 2007. *Algoritmy ispol'zovaniya osnovnykh nauchnykh metodov v konkretno-istoricheskom issledovanii* [Algorithms for the use of basic scientific methods in concrete historical research]. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University. 140 p.
10. Klyuyeva, I. A. 2017. Issledovanie primenimosti SMOTE-algoritma pri klassifikatsii nesbalansirovannykh dannykh [The study of the applicability of the SMOTE-algorithm by classification of the imbalanced data]. *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii: Sbornik tr. II Mezhdunar. nauchn.-tekhnich. i nauchn.-metodicheskoy konf.* [Modern Technologies in Science and Education: 2nd Scientific-Technical and Scientific-Methodological Conference (International) Proceedings]. Ed. O. V. Milovzorov. Ryazan: Ryazan State Radioengineering University. 1:143–146. EDN: ZCK-RHN.
11. Naydenov, A. S. 2017. Primenenie semplinga v usloviyakh nesbalansirovannosti klassov [Application of sampling in conditions of unbalanced classes]. *Informatsionnye tekhnologii: Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Information technologies: Interuniversity collection of scientific papers]. Ryazan: Ryazan State Radioengineering University. 1:73–75. EDN: ZQUNVJ.
12. Fedorov, A. N. 2010. Real'naya opora sovetskoj vlasti: sotsial'no-demograficheskie kharakteristiki gorodskogo naseleniya Rossii v 1917–1920 godakh (na materialakh Tsentral'nogo promyshlennogo rayona) [The real support of Soviet power: Socio-demographic characteristics of the urban population of Russia in 1917–1920 (on the materials of the Central Industrial District)]. *Zh. issledovaniy sotsial'noy politiki* [J. Social Policy Studies] 1(8):69–86. EDN: LDFPAF.

13. Dyakonov, A. G. 2021. Disbalans klassov [Class imbalance]. *Analiz malykh dannykh* [Small data analysis]. Available at: <https://alexanderdyakonov.wordpress.com/2021/05/27/imbalance/> (accessed October 16, 2023).
14. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2016. Ierarkhicheskaya forma predstavleniya biograficheskogo fakta [Hierarchical format of a biographical fact]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(2):108–122. doi: 10.14357/08696527160207.
15. Japkowicz, N., and S. Stephen. 2002. The class imbalance problem: A systematic study. *Intell. Data Anal.* 6(5):429–449.
16. Sevastianov, L. A., and E. Yu. Shchetinin. 2020. O metodakh povysheniya tochnosti mnogoklassovoy klassifikatsii na nesbalansirovannykh dannykh [On methods for improving the accuracy of multiclass classification on imbalanced data]. *Informatika i ee Primeneniya — Informatics and Applications* 14(1):63–70. doi: 10.14357/19922264200109.
17. Chawla, N. V., K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer. 2002. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. *J. Artif. Intell. Res.* 16:321–357. doi: 10.1613/jair.953.
18. He, H., Ya. Bai, E. A. Garcia, and Sh. Li. 2008. ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning. *IEEE Joint Conference (International) on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. Piscataway, NJ: IEEE. 1322–1328. doi: 10.1109/IJCNN.2008.4633969.
19. Category imbalance problems of machine learning (3) — sampling method. *Cnblogs.com: Massquantity blog*. Available at: <https://www.cnblogs.com/massquantity/p/9382710.html> (accessed October 16, 2023).
20. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2022. Algoritmy klasterizatsii dlya tekhnologii podderzhki konkretno-istoricheskikh issledovaniy [Clustering algorithms for technology of concrete historical investigation support]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(4):112–123. doi: 10.14357/08696527220411.

Received July 20, 2023

Contributors

Adamovich Igor M. (b. 1934) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; adam@amsd.com

Volkov Oleg I. (b. 1964) — leading programmer, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; volkov@amsd.com

ОБ АВТОРАХ

Абгарян Каринэ Карленовна (р. 1963) — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Адамович Игорь Михайлович (р. 1934) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Бесчастный Виталий Александрович (р. 1992) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы

Бирюкова Татьяна Константиновна (р. 1968) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Волков Олег Игоревич (р. 1964) — ведущий программист Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Гайдамака Юлия Васильевна (р. 1971) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы; старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Гершкович Максим Михайлович (р. 1968) — старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Голос Елизавета Сергеевна (р. 1998) — аспирант кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы

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

Грушо Александр Александрович (р. 1946) — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Николай Александрович (р. 1982) — кандидат физико-математических наук, старший 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

Забейло Михаил Иванович (р. 1956) — доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Загордан Надежда Леонидовна (р. 1984) — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Зацман Игорь Моисеевич (р. 1952) — доктор технических наук, заведующий отделом Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

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

Коновалов Григорий Михайлович (р. 1980) — кандидат физико-математических наук, заместитель руководителя проекта по качеству Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»

Коновалов Михаил Григорьевич (р. 1950) — доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кочеткова Ирина Андреевна (р. 1985) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы; старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Лебедев Александр Александрович (р. 1988) — кандидат филологических наук, доцент Петрозаводского государственного университета

Листопад Сергей Викторович (р. 1984) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Макеева Елена Дмитриевна (р. 1996) — аспирант кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы; младший научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук

Мачнев Егор Андреевич (р. 1996) — аспирант кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы

Морозов Николай Викторович (р. 1956) — старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Москин Николай Дмитриевич (р. 1980) — доктор технических наук, доцент Петрозаводского государственного университета

Мочалова Юлия Дмитриевна (р. 1996) — математик Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Острикова Дарья Юрьевна (р. 1988) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы

Писковский Виктор Олегович (р. 1963) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Плеханов Леонид Петрович (р. 1943) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Разумчик Ростислав Валерьевич (р. 1984) — доктор физико-математических наук, заместитель директора Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Рогов Александр Александрович (р. 1959) — доктор технических наук, заведующий кафедрой теории вероятностей и анализа данных Петрозаводского государственного университета

Смирнов Дмитрий Владимирович (р. 1984) — кандидат технических наук, бизнес-партнер по ИТ департамента безопасности ПАО «Сбербанк России»

Степченков Дмитрий Юрьевич (р. 1973) — 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

Тимонина Елена Евгеньевна (р. 1952) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Шоргин Всеволод Сергеевич (р. 1978) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2023 г.

	№	Стр.
Абгарян К. К., Загордан Н. Л., Мочалова Ю. Д. Метод компьютерного моделирования упругих характеристик многослойных композиционных материалов	4	92–101
Абрамов А. Г., Порхачёв В. А. Принципы разработки программного комплекса центра управления национальной исследовательской компьютерной сетью России	3	48–60
Адамович И. М., Волков О. И. Механизм формирования гипотез в технологии поддержки конкретно-исторических исследований	1	135–145
Адамович И. М., Волков О. И. Несбалансированность классов в технологии поддержки конкретно-исторических исследований	4	149–159
Адамович И. М., Волков О. И. Очистка данных в технологии поддержки конкретно-исторических исследований	3	149–160
Адамович И. М., Волков О. И. Применение алгоритма CHAID в технологии поддержки конкретно-исторических исследований	2	132–141
Архипов П. О., Филипских С. Л. Распознавание аномалий на разновременных панорамах с использованием нейросетевого метода консолидации моделей	2	13–24
Барашов Е. Б., Егоркин А. В., Лемтюжникова Д. В., Посьпкин М. А. Анализ эффективности алгоритма редукции в решении задачи об упаковке в контейнеры	3	61–75
Бесчастный В. А., Голос Е. С., Острикова Д. Ю., Мачнев Е. А., Шоргин В. С., Гайдамака Ю. В. Анализ совместного использования стратегий энергосбережения для устройств 5G с ограниченным функционалом	4	69–81
Бирюкова Т. К., Гершкович М. М. Методы оптимизации скорости выполнения функциональных запросов в автоматизированных информационных системах с учетом смыслового анализа информации	4	82–91
Бутенко Ю. И. Использование базы данных моделей структурных переводческих трансформаций для извлечения многокомпонентных терминологических единиц	1	35–44
Волков О. И. см. Адамович И. М.		
Волков О. И. см. Адамович И. М.		
Волков О. И. см. Адамович И. М.		
Волков О. И. см. Адамович И. М.		

	№	Стр.
Гайдамака Ю. В. см. Бесчастный В. А.		
Гершкович М. М. см. Бирюкова Т. К.		
Голос Е. С. см. Бесчастный В. А.		
Гончаров А. А. Поиск с исключением в параллельных текстах	4	102–114
Гринченко С. Н. Базисные информационные технологии, информационная война и многомерный иерархический территориальный суверенитет: этапы глобально-космической коэволюции	1	146–153
Грушо А. А., Грушо Н. А., Забейайло М. И., Зацаринный А. А., Тимонина Е. Е. Некоторые проблемы мониторинга информационной безопасности критической инфраструктуры	3	108–116
Грушо А. А., Грушо Н. А., Забейайло М. И., Зацаринный А. А., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я. Задача классификации в условиях искаженных причинно-следственных связей	1	59–67
Грушо А. А., Грушо Н. А., Забейайло М. И., Писковский В. О., Смирнов Д. В., Тимонина Е. Е. Автоматные модели распространения сбоев и самовосстановления	4	28–37
Грушо А. А., Забейайло М. И., Кульченков В. В., Смирнов Д. В., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я. Причинно-следственные связи в задачах анализа ненаблюдаемых свойств процессов	2	71–78
Грушо Н. А. см. Грушо А. А.		
Грушо Н. А. см. Грушо А. А.		
Грушо Н. А. см. Грушо А. А.		
Дулин С. К. см. Розенберг И. Н.		
Дурново А. А., Инькова О. Ю., Нуриев В. А. Интеграционные возможности надкорпусных баз данных	1	24–34
Дьяченко Д. Ю. см. Соколов И. А.		
Дьяченко Д. Ю. см. Степченков Ю. А.		
Дьяченко Ю. Г. см. Соколов И. А.		
Дьяченко Ю. Г. см. Степченков Ю. А.		
Дьяченко Ю. Г. см. Степченков Ю. А.		
Егоркин А. В. см. Барашов Е. Б.		
Егоров В. Б. Некоторые вопросы дезагрегации и компонуемости инфраструктуры центра обработки данных	2	101–110
Егоров В. Б. Программное определение сети в конвергентной и гиперконвергентной инфраструктурах	1	105–113
Егорова А. Ю., Зацман И. М., Романенко В. О. Машинный перевод с помощью ChatGPT: мониторинг воспроизводимости результатов	3	117–128

	№	Стр.
Забейайло М. И. см. Грушо А. А.		
Забейайло М. И. см. Грушо А. А.		
Забейайло М. И. см. Грушо А. А.		
Забейайло М. И. см. Грушо А. А.		
Загордан Н. Л. см. Абгрян К. К.		
Захаров В. Н. К 40-летию выхода постановлений ЦК КПСС и Совета Министров СССР о дальнейшем развитии работ в области вычислительной техники, в том числе в Академии наук СССР	3	4–16
Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С. Методический подход к выбору ключевых показателей эффективности для оценки организаций информационно-технологической сферы	2	79–87
Зацаринный А. А., Сучков А. П. Некоторые подходы к анализу факторов, влияющих на информационную безопасность систем искусственного интеллекта	3	95–107
Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Методический подход к контролю качества трансформации данных в междисциплинарной цифровой платформе	3	129–140
Зацаринный А. А. см. Грушо А. А.		
Зацаринный А. А. см. Грушо А. А.		
Зацман И. М. Научная парадигма информатики: классификация трансформаций объектов предметной области	4	126–138
Зацман И. М. см. Егорова А. Ю.		
Иванов В. А., Коньшев М. Ю., Смирнов С. В., Тараканов О. В., Тараканова В. О., Усовик С. В. Семантические интерпретации высоких нормальных форм отношений реляционной базы данных	1	45–58
Ильин В. Д. Теория S-символов: классы базовых S-задач	4	139–148
Ильин В. Д. Теория S-символов: концептуальные основания	1	126–134
Ильин В. Д. Теория S-символов: сетевой табс-решатель S-задач	3	141–148
Ильин В. Д. Теория S-символов: формализация знаний об S-задачах	2	124–131
Инькова О. Ю. см. Дурново А. А.		
Ионенков Ю. С. см. Зацаринный А. А.		
Кириков И. А. см. Румовская С. Б.		
Ковалёв И. А. Об оценках устойчивости и их применении для некоторых моделей массового обслуживания	1	90–104
Колин К. К. Социальная эффективность информационных технологий	3	161–171
Коновалов Г. М. Расчет целевых значений коэффициентов готовности для диагностик ИТЭР	4	38–49

	№	Стр.
Коновалов М. Г., Разумчик Р. В. Алгоритм глобальной оптимизации некоторых стационарных временных характеристик заданий в частично наблюдаемых стохастических системах с параллельным обслуживанием	4	50–59
Коновалов М. Г., Разумчик Р. В. Диспетчеризация в частично наблюдаемых стохастических системах конечной емкости с параллельным обслуживанием	3	29–47
Коньшев М. Ю. см. Иванов В. А.		
Кочеткова И. А. см. Макеева Е. Д.		
Кривенко М. П. Анализ монотонного тренда временного ряда	3	17–28
Кривенко М. П. Эффективные вычисления при факторизации матричных данных с пропусками	1	78–89
Кружков М. Г. см. Нуриев В. А.		
Кульченков В. В. см. Грушо А. А.		
Лебедев А. А. см. Москин Н. Д.		
Лемтюжникова Д. В. см. Барашов Е. Б.		
Листопад С. В. Характеристики и логическая структура методологии построения рефлексивно-активных систем искусственных гетерогенных интеллектуальных агентов	4	16–27
Макеева Е. Д., Кочеткова И. А., В. С. Шоргин Модель для выбора уровней скорости широкополосного трафика eMBB в условиях приоритетной передачи трафика URLLC в сети 5G	4	60–68
Мартюшова Я. Г., Минеева Т. А., Наумов А. В. Методы классификации пользователей СДО в модели построения их индивидуальной траектории обучения	1	68–77
Матвеев И. А. см. Сафонов И. В.		
Мачнев Е. А. см. Бесчастный В. А.		
Минеева Т. А. см. Мартюшова Я. Г.		
Морозов Н. В. см. Соколов И. А.		
Морозов Н. В. см. Степченков Ю. А.		
Москин Н. Д., Рогов А. А., Лебедев А. А. Графовые n -граммы в задаче атрибуции текстов	4	115–125
Мочалова Ю. Д. см. Абгарян К. К.		
Наумов А. В. см. Мартюшова Я. Г.		
Никитенкова С. П. Применение биспектрального анализа в обнаружении deepfake-изображений	2	25–33
Никишин Д. А. Направления развития методологической базы для работы с геоданными в перспективных геоинформационных системах	2	34–45
Никишин Д. А. Проблемы формирования системы согласованных локальных географических онтологий	3	85–94

	№	Стр.
Нуриев В. А., Кружков М. Г. Корпусные данные при контрастивном изучении пунктуации	1	14–23
Нуриев В. А. см. Дурново А. А.		
Орлов Г. А. см. Степченко Ю. А.		
Острикова Д. Ю. см. Бесчастный В. А.		
Писковский В. О. см. Грушо А. А.		
Плеханов Л. П. см. Степченко Ю. А.		
Порхачёв В. А. см. Абрамов А. Г.		
Посыпкин М. А. см. Барашов Е. Б.		
Разумчик Р. В. см. Коновалов М. Г.		
Разумчик Р. В. см. Коновалов М. Г.		
Рогов А. А. см. Москин Н. Д.		
Розенберг И. Н., Дулин С. К. Выбор технологических решений для поддержки процесса синтеза геоданных инфраструктуры железнодорожного транспорта	2	46–59
Романенко В. О. см. Егорова А. Ю.		
Румовская С. Б., Кириков И. А. Визуальный язык репрезентации процесса управления конфликтами в гибридных интеллектуальных многоагентных системах	2	60–70
Сафонов И. В., Матвеев И. А. Методология научно-исследовательской работы при создании функций систем сканирования и печати	3	76–84
Смирнов Д. В. см. Грушо А. А.		
Смирнов Д. В. см. Грушо А. А.		
Смирнов С. В. см. Иванов В. А.		
Соколов И. А., Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Дьяченко Д. Ю. Самосинхронный конвейер с переменным числом ступеней	1	4–13
Степченко Д. Ю. см. Степченко Ю. А.		
Степченко Д. Ю. см. Степченко Ю. А.		
Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Степченко Д. Ю., Дьяченко Д. Ю., Орлов Г. А. Мультиплексируемый самосинхронный конвейер	2	4–12
Степченко Ю. А., Степченко Д. Ю., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Плеханов Л. П. Замена синхронных триггеров самосинхронными аналогами в процессе десинхронизации схемы	4	4–15
Степченко Ю. А. см. Соколов И. А.		
Сучков А. П. Система ситуационного управления как мульти-сервисная технология в облачной среде: сервисы аналитики	2	88–100
Сучков А. П. Центры компетенции по искусственному интеллекту и Национальная технологическая инициатива	1	114–125

	№	Стр.
Сучков А. П. см. Зацаринный А. А.		
Тараканов О. В. см. Иванов В. А.		
Тараканова В. О. см. Иванов В. А.		
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.		
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.		
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.		
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.		
Усовик С. В. см. Иванов В. А.		
Филиппских С. Л. см. Архипов П. О		
Читалов Д. И. Разработка модуля для работы с решателем plasticStressedFoam на базе пакета OpenFOAM	2	111–123
Шабанов А. П. см. Зацаринный А. А.		
Шоргин В. С. см. Бесчастный В. А.		
Шоргин В. С. см. Макеева Е. Д.		
Шоргин С. Я. см. Грушо А. А.		
Шоргин С. Я. см. Грушо А. А.		

2023 AUTHOR INDEX

	No.	Page
Abgaryan K.K., Zagordan N.L., and Mochalova Y.D. Method for computer modeling of elastic characteristics of multilayer composite materials	4	92–101
Abramov A.G. and Porkhachev V.A. Principles of development of a software suite for the network operations Center of the National Research Computer Network of Russia	3	48–60
Adamovich I.M. and Volkov O.I. Application of the CHAID algorithm in the technology of concrete historical investigation support	2	132–141
Adamovich I.M. and Volkov O.I. Class imbalance in the technology of concrete historical investigation support	4	149–159
Adamovich I.M. and Volkov O.I. Data cleansing in the technology of concrete historical investigation support	3	149–160
Adamovich I.M. and Volkov O.I. Hypothesis formation mechanism in the technology of concrete historical investigation support	1	135–145
Arkhipov P.O. and Philippskih S.L. Recognition of anomalies on multitime panoramas using the neural network method of model amalgamation	2	13–24
Barashov E.B., Egorkin A.V., Lemtyuzhnikova D.V., and Posypkin M.A. Efficiency of the reduction algorithms in the bin packing problem	3	61–75
Beschastnyi V.A., Golos E.S., Ostrikova D.Yu., Machnev E.A., Shorgin V.S., and Gaidamaka Yu.V. Analysis of joint usage of energy conservation strategies for 5G devices with reduced capability	4	69–81
Biryukova T.K. and Gershkovich M.M. Methods for optimizing the speed of performing functional requests in automated information systems taking into account the semantic analysis of information	4	82–91
Butenko Yu. I. Using a database of structural transformations to extract multicomponent terminological units	1	35–44
Chitalov D.I. Development of a module for working with the plasticStressedFoam solver based on the OpenFOAM package	2	111–123
Diachenko D. Yu. see Sokolov I. A.		
Diachenko D. Yu. see Stepchenkov Yu. A.		
Diachenko Yu. G. see Sokolov I. A.		
Diachenko Yu. G. see Stepchenkov Yu. A.		

	No.	Page
Diachenko Yu. G. see Stepchenkov Yu. A.		
Dulin S. K. see Rozenberg I. N.		
Durnovo A. A., Inkova O. Yu., and Nuriev V. A. Integration capacities of supracorpora databases	1	24–34
Egorin A. V. see Barashov E. B.		
Egorov V. B. Some issues of disaggregation and composability of the data center infrastructure	2	101–110
Egorov V. B. The software-defined networking in converged and hyperconverged infrastructures	1	105–113
Egorova A. Yu., Zatsman I. M., and Romanenko V. O. Machine translation by ChatGPT: Monitoring of outcome reproducibility	3	117–128
Gaidamaka Yu. V. see Beschastnyi V. A.		
Gershkovich M. M. see Biryukova T. K.		
Golos E. S. see Beschastnyi V. A.		
Goncharov A. A. Search with exclusion in parallel texts	4	102–114
Grinchenko S. N. Basic information technologies, information warfare, and multidimensional hierarchical territorial sovereignty: Stages of global-space coevolution	1	146–153
Grusho A. A., Grusho N. A., Zabezhaïlo M. I., Piskovskii V. O., Smirnov D. V., and Timonina E. E. Automata models of fault propagation and self-healing	4	28–37
Grusho A. A., Grusho N. A., Zabezhaïlo M. I., Zatsarinny A. A., and Timonina E. E. Some challenges of critical infrastructure information security monitoring	3	108–116
Grusho A. A., Grusho N. A., Zabezhaïlo M. I., Zatsarinny A. A., Timonina E. E., and Shorgin S. Ya. Classification problem in conditions of distorted cause-and-effect relationships	1	59–67
Grusho A. A., Zabezhaïlo M. I., Kulchenkov V. V., Smirnov D. V., Timonina E. E., and Shorgin S. Ya. Cause-and-effect relationships in analysis of unobservable process properties	2	71–78
Grusho N. A. see Grusho A. A.		
Grusho N. A. see Grusho A. A.		
Grusho N. A. see Grusho A. A.		
Ilyin V. D. Theory of S-symbols: Network tabs-solver of S-problems	3	141–148
Ilyin V. D. Theory of S-symbols: Conceptual foundations	1	126–134
Ilyin V. D. Theory of S-symbols: Formalization of knowledge about S-problems	2	124–131
Ilyin V. D. Theory of S-symbols: The classes of basic S-problems	4	139–148

	No.	Page
Inkova O. Yu. see Durnovo A. A.		
Ionenkov Yu. S. see Zatsarinny A. A.		
Ivanov V. A., Konyshov M. Yu., Smirnov S. V., Tarakanov O. V., Tarakanova V. O., and Usovik S. V. Semantic interpretations of high normal forms of relations in a relational database	1	45–58
Kirikov I. A. see Rumovskaya S. B.		
Kochetkova I. A. see Makeeva E. D.		
Kolin K. K. Social efficiency of information technologies	3	161–171
Konovalov G. M. Calculation of availability targets for ITER diagnostics	4	38–49
Konovalov M. G. and Razumchik R. V. Algorithm for global optimization of time-related stationary characteristics of jobs in nonobservable parallel queues	4	50–59
Konovalov M. G. and Razumchik R. V. Dispatching in nonobservable parallel queues with finite capacities	3	29–47
Konyshov M. Yu. see Ivanov V. A.		
Kovalev I. A. On the perturbation bounds and their application for some queueing models	1	90–104
Krivenko M. P. Efficient computations in matrix factorization with missing components	1	78–89
Krivenko M. P. Time series monotonic trend analysis	3	17–28
Kruzhkov M. G. see Nuriev V. A.		
Kulchenkov V. V. see Grusho A. A.		
Lebedev A. A. see Moskin N. D.		
Lemtyuzhnikova D. V. see Barashov E. B.		
Listopad S. V. Characteristics and logical structure of the methodology for constructing reflexive-active systems of artificial heterogeneous intelligent agents	4	16–27
Machnev E. A. see Beschastnyi V. A.		
Makeeva E. D., Kochetkova I. A., and Shorgin V. S. Queuing model for choosing eMBB bit rate levels under URLLC priority transmission in a 5G network	4	60–68
Martyushova Ya. G., Mineyeva T. A., and Naumov A. V. Methods of classifying the distance learning system users in the model of constructing their personalized learning strategies	1	68–77
Matveev I. A. see Safonov I. V.		
Mineyeva T. A. see Martyushova Ya. G.		
Mochalova Y. D. see Abgaryan K. K.		
Morozov N. V. see Sokolov I. A.		
Morozov N. V. see Stepchenkov Yu. A.		

	No.	Page
Moskin N. D., Rogov A. A., and Lebedev A. A. Graph n -grams in the text attribution problem	4	115–125
Naumov A. V. see Martyushova Ya. G.		
Nikishin D. A. Directions of development of the methodological base for working with geodata in promising geoinformation systems	2	34–45
Nikishin D. A. Problems of formation of a system of coordinated local geographical ontologies	3	85–94
Nikitenkova S. P. Deepfake image detection using bispectral analysis	2	25–33
Nuriev V. A. and Kruzhkov M. G. The parallel corpora perspective on studying contrastive punctuation	1	14–23
Nuriev V. A. see Durnovo A. A.		
Orlov G. A. see Stepchenkov Yu. A.		
Ostrikova D. Yu. see Beschastnyi V. A.		
Philippskih S. L. see Arkhipov P. O.		
Piskovski V. O. see Grusho A. A.		
Plekhanov L. P. see Stepchenkov Yu. A.		
Porkhachev V. A. see Abramov A. G.		
Posypkin M. A. see Barashov E. B.		
Razumchik R. V. see Konovalov M. G.		
Razumchik R. V. see Konovalov M. G.		
Rogov A. A. see Moskin N. D.		
Romanenko V. O. see Egorova A. Yu.		
Rozenberg I. N. and Dulin S. K. Selection of technological solutions to support the process of synthesis of geodata of railway transport infrastructure	2	46–59
Rumovskaya S. B. and Kirikov I. A. A visual language of the representation of the conflict management process in hybrid intelligent multiagent systems	2	60–70
Safonov I. V. and Matveev I. A. Research methodology for creating functions of scanning and printing systems	3	76–84
Shabanov A. P. see Zatsarinny A. A.		
Shorgin S. Ya. see Grusho A. A.		
Shorgin S. Ya. see Grusho A. A.		
Shorgin V. S. see Beschastnyi V. A.		
Shorgin V. S. see Makeeva E. D.		
Smirnov D. V. see Grusho A. A.		
Smirnov D. V. see Grusho A. A.		
Smirnov S. V. see Ivanov V. A.		

	No.	Page
Sokolov I. A., Stepchenkov Yu. A., Diachenko Yu. G., Morozov N. V., and Diachenko D. Yu. Self-timed pipeline with variable stage number	1	4–13
Stepchenkov D. Yu. see Stepchenkov Yu. A.		
Stepchenkov D. Yu. see Stepchenkov Yu. A.		
Stepchenkov Yu. A., Diachenko Yu. G., Stepchenkov D. Yu., Diachenko D. Yu., and Orlov G. A. Multiplexed self-timed pipeline	2	4–12
Stepchenkov Yu. A., Stepchenkov D. Yu., Diachenko Yu. G., Morozov N. V., and Plekhanov L. P. Replacing synchronous triggers with self-timed counterparts during circuit desynchronization	4	4–15
Stepchenkov Yu. A. see Sokolov I. A.		
Suchkov A. P. Competence centers for artificial intelligence and the National Technology Initiative	1	114–125
Suchkov A. P. Situational management system as a multiservice technology in a cloud environment: Analytic services	2	88–100
Suchkov A. P. see Zatsarinny A. A.		
Tarakanov O. V. see Ivanov V. A.		
Tarakanova V. O. see Ivanov V. A.		
Timonina E. E. see Grusho A. A.		
Timonina E. E. see Grusho A. A.		
Timonina E. E. see Grusho A. A.		
Timonina E. E. see Grusho A. A.		
Usovik S. V. see Ivanov V. A.		
Volkov O. I. see Adamovich I. M.		
Volkov O. I. see Adamovich I. M.		
Volkov O. I. see Adamovich I. M.		
Volkov O. I. see Adamovich I. M.		
Zabezhailo M. I. see Grusho A. A.		
Zabezhailo M. I. see Grusho A. A.		
Zabezhailo M. I. see Grusho A. A.		
Zabezhailo M. I. see Grusho A. A.		
Zagordan N. L. see Abgaryan K. K.		
Zakharov V. N. To the 40th Anniversary of the Decrees of the Central Committee of the CPSU and the Council of Ministers of the USSR on the further development of work in the field of computer technology, including at the USSR Academy of Sciences	3	4–16
Zatsarinny A. A. and Ionenkov Yu. S. Methodological approach to the selection of key performance indicators for evaluating the information and technology organizations	2	79–87

	No.	Page
Zatsarinny A. A. and Shabanov A. P. Methodological approach to quality control of data transformation in an interdisciplinary digital platform	3	129–140
Zatsarinny A. A. and Suchkov A. P. Some approaches to the analysis of factors affecting the information security of artificial intelligence systems	3	95–107
Zatsarinny A. A. see Grusho A. A.		
Zatsarinny A. A. see Grusho A. A.		
Zatsman I. M. Scientific paradigm of informatics: Transformation classification of domain objects	4	126–138
Zatsman I. M. see Egorova A. Yu.		

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 положения глав 69, 70 раздела VII части IV Гражданского кодекса, которые определяют права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации, в том числе авторские права, в РФ.

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

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

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

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

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

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

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

5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редакции должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или L^AT_EX (.tex), дополнительно — в формате .pdf, на дискете, лазерном диске или электронной почтой. Предоставление бумажной рукописи необязательно.
7. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки.

Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху и снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3.

Основной текст: стиль — «Обычный», шрифт — Times New Roman, размер — 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине.

Рекомендуемый объем рукописи — не свыше 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 примеров оформления представлены в Интернете:

<http://www.ipiran.ru/publications/collected/template.doc>

8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:
 - название статьи;
 - Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
 - место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
 - сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/collected/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 resursoberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publ. 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 kompaktny tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. Moscow. D.Sc. Diss. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovary informatzionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

Описание ГОСТа:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow: Standardinform Publs. 10 p.

Описание патента:

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

10. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.
11. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:
 - указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
 - использовать attach (присоединение);
 - в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.
12. Журнал «Системы и средства информатики» является некоммерческим изданием. Плата за публикацию не взимается, гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции журнала «Системы и средства информатики»:

Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ФИЦ ИУ РАН

Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05

e-mail: 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/publication/collected/template.doc>

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):
http://www.ipiran.ru/journal/collected/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 Publs. 352 p.

Dissertation and Thesis:

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya 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 Publs. 10 p.

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

References in Latin transcription are presented in the original language.

References in the text are numbered according to the order of their first appearance; the number is placed in square brackets. All items from the reference list should be cited.

10. Manuscripts and additional materials are not returned to Authors by the Editorial Board.
11. Submissions of files by e-mail must include:
 - the journal title and author's name in the "Subject" field;
 - an article and additional materials have to be attached using the "attach" function;
 - an electronic version of the article should contain the file with the text and a separate file with figures.
12. "System and Means of Informatics" journal is not a profit publication. There are no charges for the authors as well as there are no royalties.

Editorial Board address:

FRC CSC RAS, 44, block 2, Vavilov Str., Moscow 119333, Russia

Ph.: +7 (499) 135 86 92, Fax: +7 (495) 930 45 05

e-mail: ssi@frccsc.ru (to Svetlana Strigina)

http://www.ipiran.ru/english/journal_systems.asp

SYSTEMS AND MEANS OF INFORMATICS (SISTEMY I SREDSTVA INFORMATIKI)

SCIENTIFIC JOURNAL

Volume 33 No.4 Year 2023

Editor-in-Chief and Chair of Editorial Council
Academician I. A. Sokolov

IN THIS ISSUE:

- TREPLACING SYNCHRONOUS TRIGGERS WITH SELF-TIMED COUNTERPARTS
DURING CIRCUIT DESYNCHRONIZATION
*Yu. A. Stepchenkov, D. Yu. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, N. V. Morozov,
and L. P. Plekhanov* 4
- CHARACTERISTICS AND LOGICAL STRUCTURE OF THE METHODOLOGY
FOR CONSTRUCTING REFLEXIVE-ACTIVE SYSTEMS OF ARTIFICIAL
HETEROGENEOUS INTELLIGENT AGENTS
S. V. Listopad 16
- AUTOMATA MODELS OF FAULT PROPAGATION AND SELF-HEALING
*A. A. Grusho, N. A. Grusho, M. I. Zabezhailo, V. O. Piskovski, D. V. Smirnov,
and E. E. Timonina* 28
- CALCULATION OF AVAILABILITY TARGETS FOR ITER DIAGNOSTICS
G. M. Kononov 38
- ALGORITHM FOR GLOBAL OPTIMIZATION OF TIME-RELATED STATIONARY
CHARACTERISTICS OF JOBS IN NONOBSERVABLE PARALLEL QUEUES
M. G. Kononov and R. V. Razumchik 50
- QUEUING MODEL FOR CHOOSING eMBB BIT RATE LEVELS UNDER URLLC
PRIORITY TRANSMISSION IN A 5G NETWORK
E. D. Makeeva, I. A. Kochetkova, and V. S. Shorgin 60
- ANALYSIS OF JOINT USAGE OF ENERGY CONSERVATION STRATEGIES
FOR 5G DEVICES WITH REDUCED CAPABILITY
*V. A. Beschastnyi, E. S. Golos, D. Yu. Ostrikova, E. A. Machnev, V. S. Shorgin,
and Yu. V. Gaidamaka* 69
- METHODS FOR OPTIMIZING THE SPEED OF PERFORMING FUNCTIONAL REQUESTS
IN AUTOMATED INFORMATION SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT
THE SEMANTIC ANALYSIS OF INFORMATION
T. K. Biryukova and M. M. Gershkovich 82