

Информатика и её применения

Том 15 Выпуск 4 Год 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Алгоритмы приближенного решения задачи назначения «технологического окна» на участках железнодорожной сети А. В. Босов, А. Н. Игнатов, А. В. Наумов	3
Минимаксные оценки функции потерь, основанной на интегральных вероятностях ошибок при пороговой обработке вейвлет-коэффициентов А. А. Кудрявцев, О. В. Шестаков	12
Анализ распределения предельных нагрузок в многопользовательской сети Ю. Е. Малашенко, И. А. Назарова	20
Структурированные определения дискурсивных отношений в Надкорпусной базе данных коннекторов О. Ю. Инькова, М. Г. Кружков	27
Создание стохастической динамической односекторной экономической модели с дискретным временем и анализ соответствующей задачи оптимального управления П. В. Шнурков	33
Отражение эволюции лексикографических знаний в динамических классификационных системах А. А. Гончаров, И. М. Зацман, М. Г. Кружков, Е. Ю. Лоцилова	41
Распределенная информационная система для расчета структурных свойств композиционных материалов К. К. Абгарян, Е. С. Гаврилов	50
О методах переноса глубокого обучения в задачах классификации биомедицинских изображений Е. Ю. Щетинин, Л. А. Севастьянов	59
Базис реализации сбоеустойчивых электронных схем И. А. Соколов, Ю. А. Степченков, Ю. Г. Дьяченко, Ю. В. Рождественский, А. Н. Каменских	65
О выборе частичных порядков на множествах значений признаков в задаче классификации Е. В. Дюкова, Г. О. Масляков	72
Статистика и кластеры в поисках аномальных вкраплений в условиях больших данных А. А. Грушо, Н. А. Грушо, М. И. Забейло, Д. В. Смирнов, Е. Е. Тимонина, С. Я. Шоргин	79
Модель схемы приоритетного доступа трафика URLLC и eMBB в сети пятого поколения в виде ресурсной системы массового обслуживания И. А. Кочеткова, А. И. Куцазли, П. А. Харин, С. Я. Шоргин	87
Теоретические основы формирования весового облика самолета Л. Л. Вышинский, Ю. А. Флёров	93

Информатика и её применения

Том 15 Выпуск 4 Год 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Концепция создания ВОЗ-центра компетенций по пандемиям и эпидемиям:
ключевые понятия и их терминологический анализ

И. М. Зацман **103**

Антропогенная «третья» природа: относительно автономный статус
ее искусственных интеллектуальных субъектов

С. Н. Гринченко **110**

Поправка к статье О. В. Шестакова «Пороговые функции в методах подавления шума,
основанных на вейвлет-разложении сигнала»
(Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 3. С. 51–56)

115

Поправка к статье А. А. Кудрявцева, О. В. Шестакова, С. Я. Шоргина «Метод оценивания
параметров изгиба, формы и масштаба гамма-экспоненциального распределения»
(Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 3. С. 57–62)

115

Об авторах

116

Авторский указатель за 2021 г.
2021 Author Index

118

122

Правила подготовки рукописей
Requirements for manuscripts

126

129

АЛГОРИТМЫ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НАЗНАЧЕНИЯ «ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОКНА» НА УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ*

А. В. Босов¹, А. Н. Игнатов², А. В. Наумов³

Аннотация: Развивается алгоритмическое и инструментальное обеспечение решения задач управления железнодорожным (ж/д) транспортом, основанное на представлении прикладных задач в форме оптимизационных постановок, в которых применяются средства линейного программирования. Ранее предложенные модели и прикладные постановки расширены новой задачей поиска «технологического окна» (ТО) — промежутка времени, в которое некоторые участки железнодорожной сети закрываются для проведения ремонтных работ. Для ее решения предложена математическая модель и оптимизационная постановка для одновременного поиска ТО и расписания движения поездов по некоторому сегменту ж/д сети. Исходная прикладная постановка сведена к задаче смешанного целочисленного линейного программирования. Для учета возможных вычислительных сложностей при решении задачи предложен способ поиска приближенного решения, который основан на формировании базового расписания движения и последующей его корректировки с учетом необходимости в ТО. Для поиска приближенного решения реализованы два алгоритма. В первом строится базовое и скорректированное расписание движения поездов поэтапно по группам поездов, объединенных одинаковостью станций отправлений и станций назначения, во втором этапность осуществляется по одному поезду согласно времени готовности к отправлению. Приведены результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: мультиграф; железнодорожная сеть; расписание; технологическое окно; смешанное целочисленное линейное программирование

DOI: 10.14357/19922264210401

1 Введение

Задача назначения ТО — одна из актуальных задач управления ж/д транспортом. Это задача поиска промежутка времени, в которое некоторые участки ж/д сети закрываются для проведения ремонтных работ. В идеальном случае следует выбирать ТО так, чтобы оно не влияло на расписание движения, т. е. в те моменты времени, когда участки, подлежащие ремонту, свободны от движения. Однако в связи с интенсивностью движения поездов такое не всегда возможно. При этом произвольный выбор промежутка времени для ТО может привести к задержкам и отмене поездов. В этой связи возникает задача поиска оптимального с точки зрения различных критериев промежутка времени для назначения ТО.

Среди работ, посвященных исследованию данной задачи, выделим [1–6]. В [1, 2, 4–6] рассматривалась задача назначения ТО на некотором сегменте ж/д сети, а в [3] — на одной станции. В [2, 4, 6] зада-

ча решалась одновременно с поиском расписания движения поездов, в [1, 3, 5] предлагалось корректировать некоторое исходное расписание и встраивать ТО в него. В [2, 4] движение поездов предлагалось осуществлять по некоторым заранее заданным маршрутам движения. Задача назначения ТО в [3, 4, 6] была сформулирована в виде задачи смешанного целочисленного линейного программирования.

Данная статья представляет модификацию результатов [6, 7] и продолжает развитие алгоритмического и инструментального обеспечения решения задач управления ж/д транспортом, основанного на формализации прикладных задач в математических моделях, оптимизируемых средствами линейного программирования. Развивая эту методику, в работе используется предложенная в [6] и усовершенствованная в [7] математическая модель движения по мультиграфу ж/д сети, а также представленный в [6] универсальный критерий оптимальности для формирования расписания движения. На основе

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 20-07-00046 А).

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук; Московский авиационный институт, avbosov@ipiran.ru

² Московский авиационный институт, alexei.ignatov1@gmail.com

³ Московский авиационный институт, naumovav@mail.ru

модели из [7] и ряда ограничений из [6], посвященных учету необходимости в ТО, поставлена новая задача назначения ТО на участках ж/д сети. Ввиду вычислительных сложностей при поиске оптимального решения в полученной задаче предложены два алгоритма поиска приближенного решения. Данные алгоритмы сравниваются на содержательном примере.

2 Основные обозначения и предположения

Рассмотрим ж/д сеть, представляемую неориентированным мультиграфом $G = \langle V, E \rangle$, где V — множество узлов (станций, где происходит ветвление ж/д сети, у которых число входящих путей не равно числу исходящих путей, сортировочных или конечных); E — множество ребер (путей), соединяющих данные вершины. Пусть число узлов $|V| = m$. Пронумеровав вершины графа G , составим множество индексов $V' = \{1, 2, \dots, M\}$, каждый элемент которого определяет вершину графа G . Предполагается естественное ограничение $M \geq 2$.

Пусть имеется I поездов. Для каждого i -го поезда, $i = \overline{1, I}$, заданы: индекс вершины отправления $v_i^{\text{отправ}} \in V'$; индекс вершины назначения $v_i^{\text{приб}} \in V'$; время готовности к отправлению $t_i^{\text{отправ}}$, которое вычисляется как число минут от некоторого заданного момента отсчета; максимальное время d_i , в течение которого поезду позволяет находиться в пункте отправления с момента готовности; время в пути T_i , т.е. максимальное время, в течение которого поезду позволяет находиться на ж/д сети, вычисляемое в минутах.

Движение поездов по перегонам (между вершинами) ж/д сети может осуществляться только в определенные промежутки времени. Для описания таких промежутков используется понятие множества бесконфликтных «подниток». Это некоторое подмножество всех «подниток», обладающее свойством бесконфликтности в том смысле, что в этом множестве не может быть двух «подниток», при использовании которых два поезда столкнутся. Таким множеством пользовались, например, в [8] при исследовании задачи назначения локомотивов. Далее это множество обозначается Z , считается заданным априорно, т.е. является входным параметром в рассматриваемой задаче. Пусть число элементов $|Z| = K$ и они пронумерованы от 1 до K . Каждый элемент $z_k \in Z$, $k = \overline{1, K}$, представляет собой пятерку $z_k = (v_k^{\text{нач}}, v_k^{\text{кон}}, n_k, t_k^{\text{нач}}, t_k^{\text{кон}})$, где $v_k^{\text{нач}}, v_k^{\text{кон}} \in V'$ — индексы смежных вершин в графе G начала и конца движения по «поднитке»; n_k — номер пути, соединяющего эти верши-

ны; $t_k^{\text{нач}}$ и $t_k^{\text{кон}}$ — время начала и конца движения.

На движение поезда также могут быть наложены ограничения, связанные со стоянкой на промежуточных станциях. Например, на некоторых станциях должна проходить смена локомотивов, отцепка/прицепка вагонов, а некоторые станции, напротив, надо проезжать без остановки. Поэтому введем минимально и максимально возможную длительность стоянки на станции с индексом вершины $v_k^{\text{кон}}$ после использования «поднитки» с номером k поезда с номером i : $t_{i,k}^{\text{ст.мин}}$ и $t_{i,k}^{\text{ст.макс}}$. За $T_{\text{макс}}$ обозначим длительность периода движения: например, если расписание строится на сутки, то $T_{\text{макс}} = 1440$ мин.

Пусть Δ — минимальная продолжительность ТО, а t_1^0 — время, не ранее которого ТО может начаться, а t_2^0 — закончиться. Через $Z' \subset \{1, \dots, K\}$ обозначим множество «подниток», содержащих перегоны, на которых должны проводиться работы.

3 Математическая модель движения поездов по графу железнодорожной сети

Поставим задачу отыскания времени следования указанных выше I поездов через ж/д сеть, задаваемую мультиграфом G , на основе множества «подниток» Z . Маршрутом i -го поезда называется последовательность пересекаемых им вершин.

Введем переменные $\delta_{i,j,k}$, характеризующие использование i -м поездом «поднитки» с номером k на j -м этапе маршрута следования (при движении от j -й до $(j+1)$ -й по порядку следования вершины), $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J+1}$, $k = \overline{1, K}$. Здесь J — наперед задаваемый параметр — число «реальных» этапов, на которых происходит движение от станции к станции, этап $J+1$ — технический, движения на нем не происходит, он нужен для корректного задания в модели условия прибытия в назначенный пункт. Переменная $\delta_{i,j,k}$ равна 1, если i -м поездом на j -м этапе задействована «поднитка» с номером k , иначе 0. Воспользуемся математической моделью движения по мультиграфу ж/д сети из [7], задающей следующими ограничениями на бинарные переменные $\delta_{i,j,k}$:

– для $i = \overline{1, I}$, $k = \overline{1, K}$, $m = \overline{1, M}$:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J+1} \delta_{i,j,k} \leq 1,$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{i,1,k} = 1, \quad \sum_{k=1}^K \delta_{i,1,k} v_k^{\text{нач}} = v_i^{\text{отправ}},$$

$$t_i^{\text{отправ}} \leq \sum_{k=1}^K \delta_{i,1,k} t_k^{\text{нач}} \leq t_i^{\text{отправ}} + d_i,$$

$$\sum_{j=1}^{J+1} \sum_{k: v_k^{\text{нач}}=m, 1 \leq k \leq K} \delta_{i,j,k} \leq 1; \quad (1)$$

– для $j = \overline{1, J-1}$:

$$\sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} v_k^{\text{кон}} \leq \sum_{k=1}^K \delta_{i,j+1,k} v_k^{\text{нач}} + \left(1 - \sum_{k=1}^K \delta_{i,j+1,k}\right) M^3,$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} v_k^{\text{кон}} \geq \sum_{k=1}^K \delta_{i,j+1,k} v_k^{\text{нач}} - \left(1 - \sum_{k=1}^K \delta_{i,j+1,k}\right) M,$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} (t_k^{\text{кон}} + t_{i,k}^{\text{ст.мин}}) \leq \sum_{k=1}^K \delta_{i,j+1,k} t_k^{\text{нач}} + 2 \left(1 - \sum_{k=1}^K \delta_{i,j+1,k}\right) T_{\text{макс}},$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} (t_k^{\text{кон}} + t_{i,k}^{\text{ст.макс}}) \geq \sum_{k=1}^K \delta_{i,j+1,k} t_k^{\text{нач}}; \quad (2)$$

– для $j = \overline{1, J}$:

$$\sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} t_k^{\text{кон}} - \sum_{k=1}^K \delta_{i,1,k} t_k^{\text{нач}} \leq T_i,$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} v_k^{\text{кон}} \geq \left(\sum_{k=1}^K (\delta_{i,j,k} - \delta_{i,j+1,k}) \right) v_i^{\text{приб}},$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \delta_{i,J+1,k} = 0,$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} v_k^{\text{кон}} \leq \left(1 + \sum_{k=1}^K (\delta_{i,j+1,k} - \delta_{i,j,k})\right) M + \left(\sum_{k=1}^K (\delta_{i,j,k} - \delta_{i,j+1,k}) \right) v_i^{\text{приб}}. \quad (3)$$

В ограничениях (1)–(3), в частности, учитывается, что отправление поездов может осуществляться только из соответствующих вершин отправления, движение возможно только по смежным вершинам мультиграфа G , отправление поездов из промежуточных станций на маршруте не может быть раньше

прибытия, используются маршруты, не содержащие циклов. Детальное описание представленных ограничений можно найти в [7].

4 Дополнительные ограничения для назначения «технологического окна»

Для исключения возможности движения по «подниткам», связанным с дугами мультиграфа G , подлежащими ремонту, воспользуемся ограничениями из [6]. Для этого введем вспомогательные бинарные переменные $\gamma_{k'}$ и $\varkappa_{k'}$, $k' \in Z'$, и ограничения

$$\gamma_{k'} t_{k'}^{\text{кон}} \leq t_1, \quad t_2 \leq \varkappa_{k'} t_{k'}^{\text{нач}} + (1 - \varkappa_{k'}) T_{\text{макс}},$$

$$\delta_{i,j,k'} \leq \varkappa_{k'} + \gamma_{k'}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad k' \in Z'; \quad (4)$$

$$t_2 - t_1 \geq \Delta, \quad t_1^0 \leq t_1, \quad t_2 \leq t_2^0. \quad (5)$$

Ограничения (4) позволяют исключить из движения «поднитки», попадающие в ТО. Ограничения (5) гарантируют, что ТО будет не меньше заданной длительности Δ , оно начнется не раньше t_1^0 и закончится не позднее t_2^0 .

5 Выбор критерия

Воспользовавшись критерием из [7], получаем задачу оптимизации

$$c_1 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J+1} \sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} (t_k^{\text{кон}} - t_k^{\text{нач}}) + c_2 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J+1} \hat{T}_{i,j} + c_3 \left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} t_k^{\text{нач}} - \sum_{i=1}^I t_i^{\text{отправ}} \right) \rightarrow \min \quad (6)$$

при ограничениях (1)–(5) и

$$\hat{T}_{i,j} \geq \sum_{k=1}^K \delta_{i,j+1,k} t_k^{\text{нач}} - \sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} t_k^{\text{кон}},$$

$$i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (7)$$

Критерий (6) представляет собой свертку трех критериев, вклад каждого регулируется выбором положительных констант c_1 , c_2 и c_3 . Первое слагаемое отвечает за суммарное время в движении, второе — за суммарную длительность стоянок на промежуточных станциях, третье — за суммарную длительность стоянок на станциях отправления. Через $\hat{T}_{i,j}$ обозначено время стоянки i -го поезда на $(j+1)$ -й по порядку станции в маршруте, $\hat{T}_{i,J+1} = 0$. Минимум берется по переменным $t_1, t_2, \delta_{i,j,k}, \hat{T}_{i,j} \geq 0, \gamma_{k'}, \varkappa_{k'}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J+1}, k = \overline{1, K}, k' \in Z'$.

6 Алгоритм поиска приближенного/начального решения

Как было отмечено в [7], решение задачи (6) даже при ограничениях (1)–(3) и (7) весьма трудоемко, ограничения (4) и (5) делают задачу еще сложнее, поэтому предлагается следующая последовательность действий по поиску приближенного решения. Вначале необходимо построить расписание движения в предположении отсутствия ТО. Далее ТО подбирается так, чтобы в него попадало минимальное число поездов (аналогичный прием использован для назначения ТО на станции в [3]). Далее нужно исключить «поднитки», попадающие в ТО, в том числе нарушающие ограничение (4), и заново построить расписание движения для всех поездов.

Итак, пусть найдено некоторое расписание движения поездов по всей ж/д сети. Обозначим через $Z_i \subset \{1, \dots, K\}$ множество номеров «подниток», используемых при движении i -м поездом. Далее сформируем множество номеров поездов $\bar{\mathfrak{S}} = \{i : Z_i \cap Z' \neq \emptyset\}$. Если множество $\bar{\mathfrak{S}}$ пусто, то можно назначить ТО любой длительности в пределах горизонта планирования. Если же множество $\bar{\mathfrak{S}}$ непусто, то нужно решить задачу по минимизации числа поездов, попадающих (по времени и месту) в ТО. Для этого введем дополнительные переменные $\tilde{\delta}_p$, равные 0, если маршрут поезда с номером p попадает в ТО, и 1 в обратном случае. Также введем новые переменные $\tilde{\delta}_p^{k_p}$, равные 0, если пересечение отрезков $[t_1, t_2]$ и $[t_{k_p}^{\text{нач}}, t_{k_p}^{\text{кон}}]$ состоит максимум из одной точки, и 1 иначе, $p \in \bar{\mathfrak{S}}$, $k_p \in Z_p \cap Z'$. Равенство 1 переменной $\tilde{\delta}_p^{k_p}$ означает, что используемая p -м поездом «поднитка» с номером k_p будет недоступна вследствие ТО; для равенства 0 переменной $\tilde{\delta}_p^{k_p}$ нужно выполнение условия $t_1 \geq t_{k_p}^{\text{кон}}$ либо $t_2 \leq t_{k_p}^{\text{нач}}$. Поэтому введем дополнительные переменные $\alpha_p^{k_p}$ и $\beta_p^{k_p}$:

$$\alpha_p^{k_p} = \begin{cases} 0, & \text{если } t_1 \geq t_{k_p}^{\text{кон}}; \\ 1 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$\beta_p^{k_p} = \begin{cases} 0, & \text{если } t_2 \leq t_{k_p}^{\text{нач}}; \\ 1 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Так что $\tilde{\delta}_p^{k_p} = 1$ только при $\alpha_p^{k_p} = \beta_p^{k_p} = 1$.

С использованием введенных переменных получаем следующую задачу:

$$\sum_p \tilde{\delta}_p \rightarrow \min, \quad \tilde{\delta}_p \geq \frac{1}{K} \left(\sum_{k_p} \tilde{\delta}_p^{k_p} \right),$$

$$p \in \bar{\mathfrak{S}}, \quad k_p \in Z_p \cap Z',$$

$$t_1 \geq (1 - \alpha_p^{k_p}) t_{k_p}^{\text{кон}},$$

$$t_2 \leq (1 - \beta_p^{k_p}) t_{k_p}^{\text{нач}} + \beta_p^{k_p} T_{\text{макс}},$$

$$\tilde{\delta}_p^{k_p} \geq \alpha_p^{k_p} + \beta_p^{k_p} - 1,$$

$$t_2 - t_1 \geq \Delta, \quad t_1^0 \leq t_1, \quad t_2 \leq t_2^0. \quad (8)$$

Минимум в (8) берется по переменным $t_1, t_2, \tilde{\delta}_p, \tilde{\delta}_p^{k_p}, \alpha_p^{k_p}$ и $\beta_p^{k_p}$. Заметим, что в задачу (8) включено ограничение (5).

Если оптимальное значение минимизируемого в (8) критерия $\sum_{p \in \bar{\mathfrak{S}}} \tilde{\delta}_p$ равно 0, то перестраивать имеющееся расписание не нужно. Если же оно больше 0, то нужно перестраивать расписание движения поездов с учетом «подниток», попадающих в ТО, т. е. не использовать эти «поднитки» при поиске расписания. В итоге получаем следующий алгоритм.

Шаг 1. Множество номеров поездов дробится на S непересекающихся подмножеств \mathfrak{S}_s , т. е. $\{1, \dots, I\} = \bigcup_{s=1}^S \mathfrak{S}_s$, причем $\forall s_1 \neq s_2 \quad \mathfrak{S}_{s_1} \cap \mathfrak{S}_{s_2} = \emptyset$.

Шаг 2. Инициализируется параметр $s = 1$. Формируется множество $\aleph_0 = \emptyset$.

Шаг 3. Решается задача минимизации критерия (6) с ограничениями (1)–(3) и (7) применительно к множеству поездов \mathfrak{S}_s , т. е.

$$c_1 \sum_{i \in \mathfrak{S}_s} \sum_{j=1}^{J+1} \sum_{k=1}^K \delta_{i,j,k} (t_k^{\text{кон}} - t_k^{\text{нач}}) + c_2 \sum_{i \in \mathfrak{S}_s} \sum_{j=1}^{J+1} \hat{T}_{i,j} +$$

$$+ c_3 \left(\sum_{i \in \mathfrak{S}_s} \sum_{k=1}^K \delta_{i,1,k} t_k^{\text{нач}} - \sum_{i=1}^I t_i^{\text{отправ}} \right) \rightarrow \min \quad (9)$$

при дополнительном условии

$$\delta_{i,j,k} = 0, \quad i \in \mathfrak{S}_s, \quad j = \overline{1, J+1},$$

$$k \in \bigcup_{p=0}^{s-1} \aleph_p. \quad (10)$$

Если решение этой задачи существует, то формируется множество номеров «подниток» \aleph_s , занимаемых поездами с номерами из \mathfrak{S}_s , и выполняется переход к шагу 4. В противном случае поиск приближенного решения завершен неуспешно.

Шаг 4. Если $s = S$, то выполняется переход к шагу 5. Если $s < S$, то параметр s увеличивается на единицу и выполняется переход к шагу 3.

Шаг 5. Формируется множество $\bar{\mathfrak{S}}$ согласно построенному на шагах 1–4 алгоритму расписанию. Если множество $\bar{\mathfrak{S}}$ пусто, то можно

назначить ТО любой длительности в пределах горизонта планирования и процесс поиска приближенного решения завершен успешно. Если множество \mathfrak{S} непусто, то выполняется переход к шагу 6.

Шаг 6. Решается задача (8). Пусть t_1^* и t_2^* — оптимальные значения переменных t_1 и t_2 в этой задаче. Если значение критерия в (8) равно 0, то t_1^* и t_2^* задают время для проведения ТО, расписание поездов перестраивать не нужно, процесс назначения ТО завершен успешно. Если значение критерия в (8) отлично от 0, то формируется множество

$$\mathfrak{N}' = Z' \cap \{k \in Z' : t_k^{\text{кон}} \leq t_1^*\} \cap \{k \in Z' : t_k^{\text{нач}} \geq t_2^*\}$$

и выполняется переход к шагу 3.

Шаг 7. Параметр s полагается равным 1, множества $\mathfrak{N}_p, p = \overline{0, S}$, — пустыми.

Шаг 8. Решается задача минимизации (9) при ограничениях (1)–(3), (7), (10) и дополнительном условии:

$$\delta_{i,j,k} = 0, \quad i \in \mathfrak{S}_s, \quad j = \overline{1, J+1}, \quad k \in \mathfrak{N}'.$$

Если решение этой задачи существует, то формируется множество номеров «подниток» \mathfrak{N}_s , занимаемых поездами с номерами из \mathfrak{S}_s , и выполняется переход к шагу 9. Если решения нет, то поиск приближенного решения завершен неуспешно.

Шаг 9. Если $s = S$, то t_1^* и t_2^* задают время для ТО, поиск приближенного решения завершен успешно. Если $s < S$, то параметр s увеличивается на единицу и выполняется переход к шагу 8.

Шаг 1 алгоритма требует комментария. В [7] предлагалось дробление множества поездов по направлению, т.е. множества \mathfrak{S}_s формировались по принципу нахождения в них номеров поездов, у которых были одинаковые вершины отправления, а также одинаковые вершины назначения. Чем меньше элементов в множестве, тем меньше номер этого множества. При таком дроблении будем называть приведенный алгоритм *алгоритмом по направлению* (алгоритмом 1).

Можно предложить другой способ дробления, а именно: по возрастанию времени готовности поездов к отправлению. Так, множество \mathfrak{S}_1 будет состоять из номера поезда с самым ранним временем готовности к отправлению, \mathfrak{S}_2 — со вторым и т.д. Таким образом, для данного подхода к дроблению множества поездов окажется $S = I$, а \mathfrak{S}_S — состоящим из номера поезда с самым поздним временем

готовности к отправлению. Если у нескольких поездов одинаково время готовности к отправлению, то для поезда с бóльшим номером индекс множества, в который включается этот номер, также должен быть больше. При таком дроблении будем говорить об *алгоритме по готовности* (алгоритме 2). По сути, в алгоритме 2 предполагается искать расписание последовательно по одному поезду. Подобный подход использовался в [9, 10], когда расписание движения поездов по станции предполагалось строить для каждого поезда отдельно, а расписание движения маневровых локомотивов строилось для каждой маневровой операции отдельно.

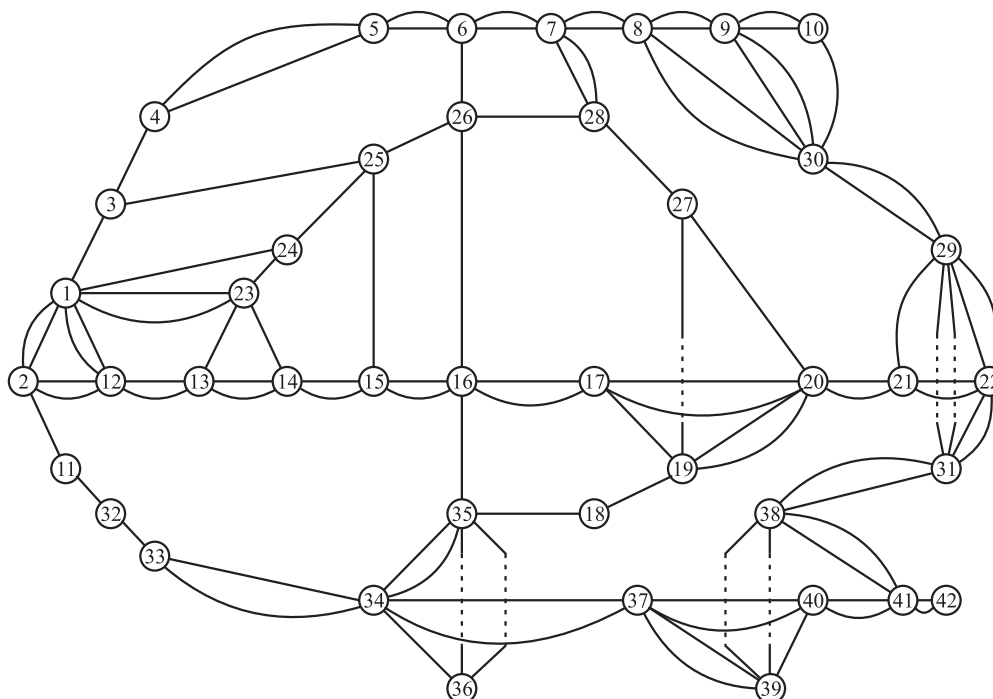
7 Пример

Рассмотрим ж/д сеть, представимую в виде мультиграфа G на рисунке. Часть ребер выделена пунктиром с целью показать разноуровневое пересечение двух ж/д путей. Нумерация путей на рисунке опущена: если две соседние вершины соединяют два ребра, т.е. два пути, то ребро, представленной прямой линией, имеет номер 1, другое же — номер 2.

Вершины отправления и назначения поездов задаются теми же начальными данными, что использовались в [7], т.е. требуется пропустить $I = 62$ поезда, а для выполнения перевозок имеется $K = 1249$ «подниток». Детальную информацию о направлении следования поездов, а также о направлениях движения по «подниткам» можно найти в [7]. Положим $J = 12$ и $c_1 = 1, c_2 = 1, c_3 = 1, t_1^0 = 0, t_2^0 = 1440, d_i = 180, t_{i,k}^{\text{ст.мин}} = 0$ и $t_{i,k}^{\text{ст.макс}} = 120, T_{\text{макс}} = 1440$. Предположим, что необходимо провести ремонтные работы на пути номер 2 между вершинами с индексами 1 и 2.

Проанализируем применимость и качество алгоритмов 1 и 2, указав в табл. 1:

- значение критерия в (6) на расписании движения при отсутствии необходимости назначения ТО, т.е. значение критерия в задаче (6) с ограничениями (1)–(3) и (7) при фиксированных $\delta_{i,j,k}$, которые задаются на шагах 1–4;
- промежуток времени для ТО, который получается на шаге 6;
- число поездов, которые попадает в ТО, вычисленное на шаге 6;
- значение критерия в задаче (6) с учетом необходимости назначения ТО, т.е. с ограничениями (1)–(3) и (7) при фиксированных значениях $\delta_{i,j,k}$, которые задаются на шагах 7–9 и при различных Δ .



Мультиграф ж/д сети G

Таблица 1 Результаты работы алгоритмов 1 и 2

Δ	Алгоритм 1				Алгоритм 2			
	Значение критерия в (6) без учета ТО	$[t_1^*, t_2^*]$	Значение критерия в (8)	Значение критерия в (6) с учетом ТО	Значение критерия в (6) без учета ТО	$[t_1^*, t_2^*]$	Значение критерия в (8)	Значение критерия в (6) с учетом ТО
600	26951	[0,600]	0	26951	27755	[0,600]	0	27755
690		[16,706]	1	27287		[16,706]	1	27841
720		[56,776]	2	27772		[56,776]	2	27911
780		[0,780]	3	28266		[0,780]	3	Нет решения
900		[0,900]	4	Нет решения		[0,900]	4	Нет решения

Как следует из табл. 1, в терминах значения критерия алгоритм 1 дает лучшие результаты, чем алгоритм 2.

Также алгоритм 1 позволяет найти решение в случае $\Delta = 780$, когда алгоритм 2 решение не находит.

Теперь проанализируем время поиска расписания движения и ТО по алгоритмам 1 и 2 при различных Δ .

Как следует из табл. 2, алгоритм 1 работает существенно дольше алгоритма 2, т. е. однозначно отдать предпочтение алгоритму 1 над алгоритмом 2 нельзя.

Таблица 2 Время работы алгоритмов 1 и 2 (в минутах)

Δ	Алгоритм 1				Алгоритм 2			
	Поиск расписания без учета ТО	Поиск ТО	Поиск расписания с учетом ТО	Итого	Поиск расписания без учета ТО	Поиск ТО	Поиск расписания с учетом ТО	Итого
600	19	0,07	0	19,07	8	0,07	0	8,07
690			14	33,07			8,1	16,17
720			23	42,07			8	16,07
780			15,78	34,85			—	—
900			—	—			—	—

Таблица 3 Маршруты движения поездов по алгоритму 1 без необходимости в ТО

Направление движения	Количество поездов	Маршрут движения
...
10 → 2	12	10 → 9 → 8 → 7 → 6 → 5 → 4 → 3 → 1 → 2
	1	10 → 30 → 29 → 22 → 21 → 20 → 17 → 16 → 15 → 14 → 13 → 12 → 2
...

Таблица 4 Маршруты движения по алгоритму 1 в случае необходимости ТО при $\Delta = 780$

Направление движения	Количество поездов	Маршрут движения
...
	10	10 → 9 → 8 → 7 → 6 → 5 → 4 → 3 → 1 → 2
10 → 2	1	10 → 30 → 9 → 8 → 7 → 6 → 5 → 4 → 3 → 1 → 2
	1	10 → 9 → 8 → 7 → 6 → 5 → 4 → 3 → 1 → 12 → 2
	1	10 → 9 → 8 → 7 → 6 → 5 → 4 → 3 → 1 → 23 → 13 → 12 → 2
...

Сравним теперь маршруты движения по алгоритму 1 в случае отсутствия (табл. 3) и при наличии (табл. 4) необходимости назначения ТО (при $\Delta = 780$).

Детальная информация о маршрутах движения в случае отсутствия необходимости назначения ТО имеется в [7].

Маршруты движения по алгоритму 1 в случае отсутствия и при необходимости назначения ТО при $\Delta = 780$ совпадают за исключением движения между вершинами с индексами 10 и 2. В частности, два поезда объезжают участок между вершинами с индексами 1 и 2, где должны проводиться ремонтные работы.

Все результаты были получены с помощью пакета ILOG CPLEX на персональном компьютере (Intel Core i5 4690; 3,5 ГГц; 8 ГБ DDR3 RAM).

8 Заключение

В работе рассмотрена задача по назначению ТО на участках ж/д сети. Оптимизационная постановка сформулирована в виде задачи смешанного целочисленного линейного программирования, которая позволяет одновременно найти расписание движения поездов по ж/д сети и промежуток времени, в который следует проводить ремонтные работы. Ввиду вычислительных сложностей при решении указанной задачи были предложены два алгоритма поиска приближенного решения. Представленный содержательный пример продемонстрировал практическую применимость предложенных алгоритмов.

Литература

1. *Albrecht A. R., Pantan D. M., Lee D. H.* Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using problem space search // *Comput. Oper. Res.*, 2013. Vol. 40. No. 3. P. 703–712.
2. *Forsgren M., Aronsson M., Gestrelus S.* Maintaining tracks and traffic flow at the same time // *J. Rail Transport Planning Management*, 2013. Vol. 3. No. 3. P. 111–123.
3. *Ignatov A. N., Naumov A. V.* On time selection for track possession assignment at the railway station // *Вестник Южно-Уральского государственного ун-та. Сер. Математическое моделирование и программирование*, 2019. Т. 12. № 3. С. 5–16.
4. *Liden T.* Coordinating maintenance windows and train traffic: A case study // *Public Transport*, 2020. Vol. 12. P. 261–298.
5. *Зиндер Я., Лазарев А. А., Мусатова Е. Г.* Корректировка расписания движения на частично заблокированном сегменте железной дороги с разъездом // *Автоматика и телемеханика*, 2020. № 5. С. 91–105. doi: 10.31857/S0005231020050062.
6. *Гайнанов Д. Н., Игнатов А. Н., Наумов А. В., Рассказова В. А.* О задаче назначения «технологического окна» на участках железнодорожной сети // *Автоматика и телемеханика*, 2020. № 6. С. 3–16. doi: 10.31857/S0005231020060013.
7. *Ignatov A. N.* On the scheduling problem of cargo transportation on a railway network segment and algorithms for its solution // *Вестник Южно-Уральского государственного ун-та. Сер. Математическое моделирование и программирование*, 2021. Т. 14. № 3. С. 61–76.
8. *Буянов М. В., Иванов С. В., Кибзун А. И., Наумов А. В.* Развитие математической модели управления грузоперевозками на участке железнодорожной сети с уче-

том случайных факторов // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 4. С. 85–93.

9. *Босов А. В., Игнатов А. Н., Наумов А. В.* Модель передвижения поездов и маневровых локомотивов на железнодорожной станции в приложении к оценке и анализу вероятности бокового столкновения //

Информатика и её применения, 2018. Т. 12. Вып. 3. С. 107–114.

10. *Игнатов А. Н., Наумов А. В.* О задаче увеличения пропускной способности железнодорожной станции // Автоматика и телемеханика, 2021. № 1. С. 102–114. doi: 10.31857/S0005231021010074.

Поступила в редакцию 28.07.2021

ALGORITHMS FOR AN APPROXIMATE SOLUTION OF THE TRACK POSSESSION PROBLEM ON THE RAILWAY NETWORK SEGMENT

A. V. Bosov^{1,2}, A. N. Ignatov², and A. V. Naumov²

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

²Moscow State Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125933, Russian Federation

Abstract: Algorithmic and instrumental support for solving problems of railway transport control, based on the presentation of applied problems in the form of optimization statements in which linear programming tools are used, is being developed. Previously proposed models and applied statements are expanded with a new problem of finding a track possession — a time interval at which some sections of the railway network are closed for repair work. To solve it, a mathematical model and an optimization statement are proposed for the simultaneous search for a track possession and a train schedule for a certain segment of the railway network. The original setting is reduced to a mixed integer linear programming problem. To take into account possible computational difficulties in solving the problem, a method for finding an approximate solution is proposed which is based on the formation of a basic schedule of movement and its subsequent correction taking into account the need for the track possession. To find an approximate solution, two algorithms have been implemented. In the first, a basic and adjusted train timetable is built in stages by groups of trains united by the same departure and destination stations, and in the second, stages are carried out one train at a time according to the time of readiness for departure. The results of a numerical experiment are presented.

Keywords: multigraph; railway network; schedule; track possession; mixed integer linear programming

DOI: 10.14357/19922264210401

Acknowledgments

This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 20-07-00046 A).

References

1. Albrecht, A. R., D. M. Panton, and D. H. Lee. 2013. Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using problem space search. *Comput. Oper. Res.* 40(3):703–712.
2. Forsgren, M., M. Aronsson, and S. Gestrelus. 2013. Maintaining tracks and traffic flow at the same time. *J. Rail Transport Planning Management* 3(3):111–123.
3. Ignatov, A. N., and A. V. Naumov. 2019. On time selection for track possession assignment at the railway station. *Bull. South Ural State University. Ser. Math. Modelling Programming Computer Software* 12(3):5–16.
4. Liden, T. 2020. Coordinating maintenance windows and train traffic: A case study. *Public Transport* 12:261–298.
5. Zinder, Y., A. A. Lazarev, and E. G. Musatova. 2020. Rescheduling traffic on a partially blocked segment of railway with a siding. *Automat. Rem. Contr.* 81(6):955–966.
6. Gainanov, D. N., A. N. Ignatov, A. V. Naumov, and V. A. Rasskazova. 2020. On track possession assignment problem at the railway network sections. *Automat. Rem. Contr.* 81(6):967–977.
7. Ignatov, A. N. 2021. On the scheduling problem of cargo transportation on a railway network segment and algorithms for its solution. *Bull. South Ural State University. Ser. Math. Modelling Programming Computer Software* 14(3):61–76.
8. Buyanov, M. V., S. V. Ivanov, A. I. Kibzun, and A. V. Naumov. 2017. Razvitie matematicheskoy modeli upravleniya grupoperevozkami na uchastke zheleznodorozhnoy seti s uchetom sluchaynykh faktorov [Development of the mathematical model of cargo transportation control on

- a railway network segment taking into account random factor]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(4): 85–93.
9. Bosov, A. V., A. N. Ignatov, and A. V. Naumov. 2018. Model' peredvizheniya poezdov i manevroykh lokomotivov na zheleznodorozhnoy stantsii v prilozhenii k otsenke i analizu veroyatnosti bokovogo stolknoveniya [Transportation of trains and shunting locomotives at the railway station model for evaluating and analysis of side-collision probabilities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 12(3):107–114.
10. Ignatov, A. N., and A. V. Naumov. 2021. On the problem of increasing the railway station capacity. *Automat. Rem. Contr.* 82(1):102–114.

Received July 28, 2021

Contributors

Bosov Alexey V. (b. 1969) — Doctor of Science in technology, principal scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; professor, Moscow State Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125933, Russian Federation; AVBosov@ipiran.ru

Naumov Andrey V. (b. 1966) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125933, Russian Federation; naumovav@mail.ru

Ignatov Aleksei N. (b. 1991) — Candidate of Science in physics and mathematics, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125933, Russian Federation; alexei.ignatov1@gmail.com

МИНИМАКСНЫЕ ОЦЕНКИ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ, ОСНОВАННОЙ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ВЕРОЯТНОСТЯХ ОШИБОК ПРИ ПОРОГОВОЙ ОБРАБОТКЕ ВЕЙВЛЕТ-КОЭФФИЦИЕНТОВ*

А. А. Кудрявцев¹, О. В. Шестаков²

Аннотация: Подавление шума — одна из основных задач обработки сигналов. Методы решения этой задачи, основанные на вейвлет-преобразовании, доказали свою надежность и эффективность. Особенно популярными стали методы пороговой обработки, использующие идею разреженного представления функции сигнала в пространстве вейвлет-коэффициентов. Эти методы используют быстрые нелинейные алгоритмы, адаптирующиеся к локальным особенностям обрабатываемого сигнала. Параметры этих алгоритмов выбираются на основе некоторого критерия качества или минимизации заданной функции потерь. Чаще всего в качестве функции потерь рассматривается среднеквадратичный риск. Однако в некоторых приложениях минимизация среднеквадратичного риска не всегда приводит к удовлетворительным результатам. В данной работе рассматривается функция потерь, основанная на интегральных вероятностях ошибок вычисления вейвлет-коэффициентов. Для методов жесткой и мягкой пороговой обработки вычисляются границы для оптимальных пороговых значений и оценивается минимаксный порядок данной функции потерь в классе регулярных по Липшицу функций сигналов.

Ключевые слова: вейвлеты; оценка риска; пороговая обработка

DOI: 10.14357/19922264210402

1 Введение

При обработке сигналов методы подавления шума обычно разрабатываются с целью минимизации некоторой функции потерь, которая количественно определяет расстояние между истинным сигналом и его оценкой. Самая популярная в литературе функция потерь представляет собой среднеквадратичную погрешность (риск). В последние годы одним из распространенных подходов к задаче подавления шума стал аппарат вейвлет-анализа в сочетании с процедурами пороговой обработки. При этом в качестве функции потерь все чаще рассматривается не только среднеквадратичный риск, но и другие функции, минимизация которых в некоторых случаях приводит к более качественным оценкам сигнала. В частности, в работах [1, 2] предложена функция потерь, основанная на вероятностях ошибок вычисления вейвлет-коэффициентов. Для методов пороговой обработки асимптотическое поведение такой функции потерь исследовано в работах [3, 4]. В данной работе рассматривается функция потерь, также предложенная

в работе [2], которая представляет собой усреднение вероятности ошибок вычисления вейвлет-коэффициентов по абсолютному значению ошибки. Оценивается асимптотический порядок данной функции потерь и вычисляются оценки для минимаксного порогового значения в классе регулярных по Липшицу функций.

2 Модель данных и метод подавления шума

Рассмотрим следующую модель наблюдаемых данных:

$$X_i = f_i + w_i, \quad i = 1, \dots, 2^J, \quad J > 0,$$

где f_i — отсчеты функции полезного сигнала f , а w_i — независимые случайные величины, имеющие нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

Для «экономного» представления полезного сигнала к данным, как правило, применяется какое-то специальное преобразование. В данной

* Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект».

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики; Московский центр фундаментальной и прикладной математики, nubigena@mail.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук; Московский центр фундаментальной и прикладной математики, oshestakov@cs.msu.ru

работе рассматривается вейвлет-преобразование, которое заключается в умножении вектора значений X_i на ортогональную матрицу вейвлет-преобразования, зависящую от типа выбранной вейвлет-функции [5]. В результате получается набор эмпирических вейвлет-коэффициентов

$$Y_{j,k} = \mu_{j,k} + \zeta_{j,k}, \quad j = 0, \dots, J-1, \quad k = 0, \dots, 2^j - 1,$$

где $\mu_{j,k}$ — вейвлет-коэффициенты полезного сигнала, а случайные величины $\zeta_{j,k}$ также независимы и имеют нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

Предположим, что функция полезного сигнала задана на конечном отрезке $[a, b]$ и равномерно регулярна по Липшицу с некоторым показателем $\gamma > 0$ и константой Липшица $L > 0$: $f \in \text{Lip}(\gamma, L)$. Известно [5], что если вейвлет-функция M раз непрерывно дифференцируема ($M \geq \gamma$), имеет M нулевых моментов и достаточно быстро убывает на бесконечности вместе со своими производными, то найдется такая константа $A > 0$, что

$$|\mu_{j,k}| \leq \frac{A \cdot 2^{J/2}}{2^{j(\gamma+1/2)}}, \quad j = 0, \dots, J-1, \quad k = 0, \dots, 2^j - 1. \quad (1)$$

Далее предполагается, что функция сигнала и вейвлет-функция удовлетворяют указанным требованиям.

Распространенным методом подавления шума является так называемая пороговая обработка, смысл которой заключается в обнулении коэффициентов, чьи абсолютные значения не превышают заданного порога. Поскольку после вейвлет-преобразования основная часть полезного сигнала сосредоточивается в относительно небольшом числе вейвлет-коэффициентов, абсолютная величина которых довольно велика, а характеристики шума не меняются, такая процедура удаляет большую часть шума, не сильно затрагивая полезный сигнал.

Через $\hat{Y}_{j,k}$ обозначим оценку вейвлет-коэффициента, которая получается с помощью пороговой обработки, задаваемой для порога T некоторой функцией $\rho_T(x)$: $\hat{Y}_{j,k} = \rho_T(Y_{j,k})$. В данной работе рассматриваются функции жесткой пороговой обработки $\rho_T^{(h)}(x) = x \cdot \mathbf{1}(|x| > T)$ и мягкой пороговой обработки $\rho_T^{(s)}(x) = \text{sign}(x)(|x| - T)_+$.

Порог T выбирается с целью минимизировать погрешность (или функцию потерь) вычисления функции сигнала. Одна из самых популярных характеристик этой погрешности — среднеквадратичный риск. Однако минимизация данной функции потерь оказывается не всегда удовлетворительной с точки зрения, например, визуального восприятия

или отношения сигнал/шум. В работе [1] предложено рассмотреть функцию потерь, основанную на вероятностях ошибок вычисления вейвлет-коэффициентов.

Пусть двумерная случайная величина (ξ, η) не зависит от всех $\zeta_{j,k}$ и имеет дискретное равномерное распределение на множестве индексов $j = 0, \dots, J-1, k = 0, \dots, 2^j - 1$. Для заданного уровня ошибки $\varepsilon > 0$ определим функцию потерь как

$$p_J(f) = \text{EP} \left(\left| \hat{Y}_{\xi, \eta} - \mu_{\xi, \eta} \right| > \varepsilon \mid \xi, \eta \right) = \frac{\sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \text{P} \left(\left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| > \varepsilon \right)}{2^J}. \quad (2)$$

В той же работе [1] показано, что оценки, целью которых ставится минимизация риска, основанного на вероятностях ошибок вычисления вейвлет-коэффициентов, дают сравнимые, а иногда и лучшие результаты, чем оценки, минимизирующие среднеквадратичный риск. В работах [3, 4] исследовано асимптотическое поведение данной функции потерь и вычислены минимаксные значения порогов для жесткой и мягкой пороговой обработки.

Выражение (2) зависит от уровня ошибки $\varepsilon > 0$, который представляет собой настраиваемый параметр метода. Чтобы избавиться от этой зависимости, в работе [2] предложено рассмотреть усреднение функции потерь по ε .

Рассмотрим следующий вид функции потерь:

$$r_J(f) = \int_0^\infty \text{EP} \left(\left| \hat{Y}_{\xi, \eta} - \mu_{\xi, \eta} \right| > \varepsilon \mid \xi, \eta \right) d\varepsilon = \frac{\sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \int_0^\infty \text{P} \left(\left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| > \varepsilon \right) d\varepsilon}{2^J} = \frac{\sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \text{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right|}{2^J}.$$

Цель данной работы — поиск оптимального порога и оценивание максимального порядка r_J в классе функций $\text{Lip}(\gamma, L)$:

$$R_J = \sup_{f \in \text{Lip}(\gamma, L)} r_J(f). \quad (3)$$

Заметим, что максимальным среди «разумных» порогов является так называемый «универсальный» порог $T_U = \sigma \sqrt{2 \ln 2^J}$. При таком пороге с большой вероятностью удаляется практически весь шум, а если взять порог выше, то можно удалить важные компоненты полезного сигнала (подробнее см. [6]).

Таким образом, далее будем считать, что $T \leq T_U$. При этом порог T также должен возрастать по J [7].

Далее символом \asymp обозначается порядок рассматриваемой величины по J , т. е. $a_J \asymp b_J$, если начиная с некоторого J выполнено $C_1 b_J \leq a_J \leq C_2 b_J$ для некоторых положительных констант C_1 и C_2 . Также будем использовать обозначения C , C_i и т. п. для некоторых положительных констант, которые могут зависеть от параметров модели, но не зависят от J . При этом в разных соотношениях одними и теми же буквами могут обозначаться разные константы.

3 Оценки функции потерь

Рассмотрим жесткую пороговую обработку: $\hat{Y}_{j,k} = \rho_T^{(h)}(Y_{j,k})$.

Теорема 1.

1. Пусть $\gamma \leq 1/2$. При выборе асимптотически оптимального порога для жесткой пороговой обработки функция потерь (3) удовлетворяет соотношению:

$$R_J \asymp \begin{cases} 2^{-\gamma J}, & \gamma < \frac{1}{2}; \\ 2^{-J/2} J, & \gamma = \frac{1}{2}. \end{cases}$$

При этом значение асимптотически оптимального порога равно

$$T_*^{(h)} = \begin{cases} \sigma \sqrt{2\gamma \ln 2^J}, & \gamma < \frac{1}{2}; \\ \sigma \sqrt{\ln 2^J} - \sigma \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}, & \gamma = \frac{1}{2}. \end{cases}$$

II. Пусть $\gamma > 1/2$. При выборе асимптотически оптимального порога для жесткой пороговой обработки функция потерь (3) удовлетворяет неравенствам:

$$C_1^{(h)} \cdot 2^{-(2\gamma/(2\gamma+1))J} \leq R_J \leq C_2^{(h)} \cdot 2^{-(2\gamma/(2\gamma+1))J} J^{(2\gamma+3)/(4\gamma+2)},$$

где $C_1^{(h)}$ и $C_2^{(h)}$ — некоторые положительные константы. Для асимптотически оптимального значения порога, минимизирующего порядок функции потерь (3) при жесткой пороговой обработке, начиная с некоторого J справедливо неравенство $T_m^{(h)} \leq T \leq T_M^{(h)}$, где

$$T_m^{(h)} = \sigma \sqrt{\frac{4\gamma}{2\gamma+1} \ln 2^J} - \sigma \frac{2\gamma+3}{4\gamma+2} \sqrt{\frac{2\gamma+1}{4\gamma} \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}};$$

$$T_M^{(h)} = \sigma \sqrt{\frac{4\gamma}{2\gamma+1} \ln 2^J}.$$

Доказательство. Воспользовавшись свойством вейвлет-коэффициентов (1), разобьем множество индексов $\{0, \dots, J-1\}$ на три класса в зависимости от величины $|\mu_{j,k}|$. Пусть индексы j_1 и j_2 ($j_1 < j_2$) таковы, что

$$|\mu_{j,k}| \leq c, \quad j_1 \leq j \leq j_2 - 1;$$

$$|\mu_{j,k}| \leq \frac{c}{T}, \quad j_2 \leq j \leq J-1,$$

где c — некоторая положительная константа. Тогда (с точностью до аддитивной константы)

$$j_1 = \frac{J}{2\gamma+1}; \quad j_2 = \frac{J}{2\gamma+1} + \frac{\log_2 T}{\gamma+1/2}.$$

Разобьем сумму в определении функции потерь на три составляющие:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \mathbb{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| = \\ & = \sum_{j=0}^{j_1-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \mathbb{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| + \sum_{j=j_1}^{j_2-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \mathbb{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| + \\ & + \sum_{j=j_2}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \mathbb{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| \equiv S_1 + S_2 + S_3. \quad (4) \end{aligned}$$

Рассмотрим S_3 . Для каждого слагаемого из этой суммы начиная с некоторого J имеем:

$$\begin{aligned} \mathbb{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| &= \mathbb{E} \left| \rho_T^{(h)}(Y_{j,k}) - \mu_{j,k} \right| = \\ &= \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-(T-\mu_{j,k})^2/(2\sigma^2)} + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-(T+\mu_{j,k})^2/(2\sigma^2)} + \\ &+ |\mu_{j,k}| \left(\Phi \left(\frac{T-\mu_{j,k}}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{-T-\mu_{j,k}}{\sigma} \right) \right). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} S_3 &= \sum_{j=j_2}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-(T-\mu_{j,k})^2/(2\sigma^2)} + \right. \\ &+ \left. \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-(T+\mu_{j,k})^2/(2\sigma^2)} \right) + \\ &+ \sum_{j=j_2}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} |\mu_{j,k}| \left(\Phi \left(\frac{T-\mu_{j,k}}{\sigma} \right) - \right. \\ &- \left. \Phi \left(\frac{-T-\mu_{j,k}}{\sigma} \right) \right) \equiv S_{31} + S_{32}. \end{aligned}$$

Так как T растет с увеличением J и выполнено соотношение (1), найдется такая константа C , что

$$S_{32} \leq \sum_{j=j_2}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \frac{A \cdot 2^{J/2}}{2^{j(\gamma+1/2)}} \leq \begin{cases} C2^{(1-\gamma)J}, & \gamma < \frac{1}{2}; \\ C2^{J/2}J, & \gamma = \frac{1}{2}; \\ C2^{J/(2\gamma+1)}T^{(1/2-\gamma)/(1/2+\gamma)}, & \gamma > \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

Найдем верхнюю оценку для функции потерь (3). Заметим, что

$$\begin{aligned} \mathbb{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| &\leq \min\{|\mu_{j,k}|, T\} + 3\sigma\sqrt{\frac{2}{\pi}}; \quad (6) \\ S_1 + S_2 &\leq C2^{J/(2\gamma+1)}T^{(2\gamma+3)/(2\gamma+1)}. \quad (7) \end{aligned}$$

Если $\gamma < 1/2$, то с учетом поведения T получаем, что правая часть (5) растет по J быстрее, чем правая часть (7). Поэтому для получения верхней оценки для функции потерь в качестве порога следует выбрать такое наименьшее значение T , при котором S_{31} будет расти не быстрее, чем S_{32} . Поскольку при $j > j_2$ величины $|\mu_{j,k}|$ не влияют на порядок S_{31} ,

$$S_{31} = \sum_{j=j_2}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-(T-\mu_{j,k})^2/(2\sigma^2)} + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-(T+\mu_{j,k})^2/(2\sigma^2)} \right) \asymp 2^J e^{-T^2/(2\sigma^2)}$$

и из условия $S_{31} \asymp S_{32}$ получаем

$$T = \sigma\sqrt{2\gamma \ln 2^J}.$$

Теперь предположим, что $\gamma > 1/2$. В этом случае правая часть (7) растет быстрее, чем правая часть (5), и в качестве порога T следует выбирать наименьшее значение, при котором S_{31} будет расти не быстрее, чем правая часть (7). Порог $T_m^{(h)}$, удовлетворяющий соотношению

$$2^J e^{-T^2/(2\sigma^2)} \asymp 2^{J/(2\gamma+1)} T^{(2\gamma+3)/(2\gamma+1)},$$

обеспечивает равенство порядков S_{31} и правой части (7) и, таким образом, служит нижней границей (с точностью до величины порядка $O(1/\sqrt{\ln 2^J})$) для асимптотически оптимального в смысле функции потерь R_J порога. Отсюда

$$T_m^{(h)} = \sigma\sqrt{\frac{4\gamma}{2\gamma+1} \ln 2^J} - \sigma\frac{2\gamma+3}{4\gamma+2} \sqrt{\frac{2\gamma+1}{4\gamma} \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}}.$$

Случай $\gamma = 1/2$ аналогичен случаю $\gamma < 1/2$, поскольку при этом также следует выбирать наименьшее значение порога, при котором S_{31} будет расти не быстрее, чем правая часть (5), а порядок правой части (7) при этом будет равен порядку правой части (5). Таким образом, в этом случае

$$T = \sigma\sqrt{\ln 2^J} - \sigma\frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}.$$

Теперь найдем нижнюю границу для функции потерь (3). Заметим, что найдется такая функция $f \in \text{Lip}(\gamma, L)$, что в неравенстве (1) при некоторой константе A будет достигаться равенство [5]. Следовательно, для этой функции

$$S_{32} \asymp \begin{cases} 2^{(1-\gamma)J}, & \gamma < \frac{1}{2}; \\ 2^{J/2}J, & \gamma = \frac{1}{2}; \\ 2^{J/(2\gamma+1)}T^{(1/2-\gamma)/(1/2+\gamma)}, & \gamma > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (8)$$

и $|\mu_{j,k}| > c$ при $0 \leq j \leq j_1 - 1$. Тогда

$$\begin{aligned} \mathbb{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| &= \int_0^\infty \mathbb{P} \left(\left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| > \varepsilon \right) d\varepsilon \geq \\ &\geq \int_0^c \mathbb{P} \left(\left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| > \varepsilon \right) d\varepsilon \geq \\ &\geq \int_0^c \mathbb{P} \left(|Y_{j,k} - \mu_{j,k}| > \varepsilon \right) d\varepsilon \geq \\ &\geq c \mathbb{P} \left(|Y_{j,k} - \mu_{j,k}| > c \right) = c \left(2 - 2\Phi \left(\frac{c}{\sigma} \right) \right). \end{aligned}$$

В этом случае с учетом (6) для суммы S_1 в (4) начиная с некоторого J справедливы соотношения:

$$C_1 2^{J/(2\gamma+1)} \leq S_1 \leq C_2 2^{J/(2\gamma+1)} T. \quad (9)$$

Если $\gamma < 1/2$, то S_{32} растет по J быстрее, чем S_1 . Поэтому в данном случае нижняя оценка функции потерь совпадает с верхней и оптимальное значение порога равно

$$T = \sigma\sqrt{2\gamma \ln 2^J}.$$

Если $\gamma > 1/2$, то с учетом поведения T получаем, что S_1 растет быстрее, чем S_{32} , и порог следует выбирать, приравняв порядки S_{31} и S_1 . Равенство

порядков в этом случае обеспечивает порог $T_M^{(h)}$, удовлетворяющий соотношению:

$$2^J e^{-T^2/(2\sigma^2)} \asymp 2^{J/(2\gamma+1)}.$$

Отсюда

$$T_M^{(h)} = \sigma \sqrt{\frac{4\gamma}{2\gamma+1} \ln 2^J}.$$

Заметим, что сумма S_2 в данных рассуждениях не присутствует. Это означает, что истинное значение R_J имеет порядок не ниже данного, т.е. рассматриваемый порядок служит нижней оценкой для истинного порядка функции потерь, а $T_M^{(h)}$ — верхней границей для асимптотически оптимального порога.

Случай $\gamma = 1/2$ аналогичен случаю $\gamma < 1/2$, поскольку в этой ситуации S_1 растет по J не быстрее, чем S_{32} (так как $T \leq T_U$), и оптимальное значение порога следует искать, приравняв порядки S_{31} и S_{32} . При этом оптимальное значение порога, как и при выводе оценки сверху, равно

$$T = \sigma \sqrt{\ln 2^J} - \sigma \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}$$

и нижняя оценка функции потерь совпадает с верхней. Теорема доказана.

Теперь рассмотрим мягкую пороговую обработку: $\hat{Y}_{j,k} = \rho_T^{(s)}(Y_{j,k})$.

Теорема 2.

1. Пусть $\gamma \leq 1/2$. При выборе асимптотически оптимального порога для мягкой пороговой обработки функция потерь (3) удовлетворяет соотношению:

$$R_J \asymp \begin{cases} 2^{-\gamma J}, & \gamma < \frac{1}{2}; \\ 2^{-J/2} J, & \gamma = \frac{1}{2}. \end{cases}$$

При этом значение асимптотически оптимального порога равно

$$T_*^{(s)} = \begin{cases} \sigma \sqrt{2\gamma \ln 2^J} - \frac{\sigma}{\sqrt{2\gamma}} \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}, & \gamma < \frac{1}{2}; \\ \sigma \sqrt{\ln 2^J} - 2\sigma \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}, & \gamma = \frac{1}{2}. \end{cases}$$

II. Пусть $\gamma > 1/2$. При выборе асимптотически оптимального порога для мягкой пороговой обработки функция потерь (3) удовлетворяет неравенствам:

$$C_1^{(s)} \cdot 2^{-(2\gamma/(2\gamma+1))J} \leq R_J \leq C_2^{(s)} \cdot 2^{-(2\gamma/(2\gamma+1))J} J^{(2\gamma+3)/(4\gamma+2)},$$

где $C_1^{(s)}$ и $C_2^{(s)}$ — некоторые положительные константы. Для асимптотически оптимального значения порога, минимизирующего порядок функции потерь (3) при мягкой пороговой обработке, начиная с некоторого J справедливо неравенство $T_m^{(s)} \leq T \leq T_M^{(s)}$, где

$$T_m^{(s)} = \sigma \sqrt{\frac{4\gamma}{2\gamma+1} \ln 2^J} - \sigma \frac{6\gamma+5}{4\gamma+2} \sqrt{\frac{2\gamma+1}{4\gamma}} \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}};$$

$$T_M^{(s)} = \sigma \sqrt{\frac{4\gamma}{2\gamma+1} \ln 2^J} - \sigma \sqrt{\frac{2\gamma+1}{4\gamma}} \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}.$$

Доказательство. Представим функцию потерь в виде (4) так же, как в доказательстве теоремы 1. Для каждого слагаемого из S_3 начиная с некоторого J имеем:

$$\begin{aligned} \mathbb{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| &= \mathbb{E} \left| \rho_T^{(s)}(Y_{j,k}) - \mu_{j,k} \right| \asymp \\ &\asymp \frac{e^{-T^2/(2\sigma^2)}}{T^2} + \\ &+ |\mu_{j,k}| \left(\Phi \left(\frac{T - \mu_{j,k}}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{-T - \mu_{j,k}}{\sigma} \right) \right). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} S_3 &\asymp \frac{2^J e^{-T^2/(2\sigma^2)}}{T^2} + \\ &+ \sum_{j=j_2}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} |\mu_{j,k}| \left(\Phi \left(\frac{T - \mu_{j,k}}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{-T - \mu_{j,k}}{\sigma} \right) \right) \equiv \\ &\equiv S_{31} + S_{32}. \end{aligned}$$

Найдем верхнюю оценку для функции потерь. Поскольку справедливо соотношение

$$\mathbb{E} \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| \leq CT, \tag{10}$$

для $S_1 + S_2$ справедлива оценка (7).

Если $\gamma < 1/2$, то, поступая, как в доказательстве теоремы 1, в качестве порога следует выбрать такое наименьшее значение T , при котором S_{31} будет расти не быстрее, чем S_{32} . Приравнявая порядки S_{31} и правой части (5), получаем

$$T = \sigma \sqrt{2\gamma \ln 2^J} - \frac{\sigma}{\sqrt{2\gamma}} \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}.$$

Теперь предположим, что $\gamma > 1/2$. В этом случае правая часть (7) растет быстрее, чем правая часть (5), и в качестве порога T следует выбирать наименьшее значение, при котором S_{31} будет расти не быстрее, чем правая часть (7). Порог $T_m^{(s)}$, удовлетворяющий соотношению

$$\frac{2^J e^{-T^2/(2\sigma^2)}}{T^2} \asymp 2^{J/(2\gamma+1)} T^{(2\gamma+3)/(2\gamma+1)},$$

обеспечивает равенство порядков S_{31} и правой части (7) и, таким образом, служит нижней границей (с точностью до величины порядка $O(1/\sqrt{\ln 2^J})$) для асимптотически оптимального в смысле функции потерь R_J порога. Отсюда

$$T_m^{(s)} = \sigma \sqrt{\frac{4\gamma}{2\gamma+1} \ln 2^J} - \sigma \frac{6\gamma+5}{4\gamma+2} \sqrt{\frac{2\gamma+1}{4\gamma} \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}}.$$

Случай $\gamma = 1/2$ аналогичен случаю $\gamma < 1/2$, поскольку при этом также следует выбирать наименьшее значение порога, при котором S_{31} будет расти не быстрее, чем правая часть (5), а порядок правой части (7) при этом будет равен порядку правой части (5). Таким образом, в этом случае

$$T = \sigma \sqrt{\ln 2^J} - 2\sigma \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}.$$

Теперь найдем нижнюю границу для функции потерь (3). Как и в доказательстве теоремы 1, можно выбрать такую функцию $f \in \text{Lip}(\gamma, L)$, что в неравенстве (1) при некоторой константе A будет достигаться равенство. Для этой функции справедливо соотношение (8) и $|\mu_{j,k}| > c$ при $0 \leq j \leq j_1 - 1$. Следовательно, для любого $\delta \in (0, 1)$ начиная с некоторого J

$$\begin{aligned} E \left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| &= \int_0^\infty P \left(\left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| > \varepsilon \right) d\varepsilon \geq \\ &\geq \int_0^c P \left(\left| \hat{Y}_{j,k} - \mu_{j,k} \right| > c \right) d\varepsilon = \\ &= \int_0^c \left(1 - \Phi \left(\frac{T+c}{\sigma} \right) + \Phi \left(\frac{T-c}{\sigma} \right) \right) d\varepsilon \geq c\delta \end{aligned}$$

и с учетом (10) для суммы S_1 начиная с некоторого J справедливы соотношения (9).

Если $\gamma < 1/2$, то S_{32} растет по J быстрее, чем S_1 . Поэтому в данном случае нижняя оценка функции потерь совпадает с верхней и оптимальное значение порога равно

$$T = \sigma \sqrt{2\gamma \ln 2^J} - \frac{\sigma}{\sqrt{2\gamma}} \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}.$$

Если $\gamma > 1/2$, то S_1 растет быстрее, чем S_{32} , и, как в доказательстве теоремы 1, порог следует выбирать, приравняв порядки S_{31} и S_1 . Равенство порядков в этом случае обеспечивает порог $T_M^{(s)}$, удовлетворяющий соотношению:

$$\frac{2^J e^{-T^2/(2\sigma^2)}}{T^2} \asymp 2^{J/(2\gamma+1)}.$$

Отсюда

$$T_M^{(s)} = \sigma \sqrt{\frac{4\gamma}{2\gamma+1} \ln 2^J} - \sigma \sqrt{\frac{2\gamma+1}{4\gamma} \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}}.$$

Так как сумма S_2 в данных рассуждениях не присутствует, истинное значение R_J имеет порядок не ниже данного, т. е. рассматриваемый порядок служит нижней оценкой для истинного порядка функции потерь, а $T_M^{(s)}$ — верхней границей для асимптотически оптимального порога.

Случай $\gamma = 1/2$ аналогичен случаю $\gamma < 1/2$, поскольку в этой ситуации S_1 растет по J не быстрее, чем S_{32} , и оптимальное значение порога следует искать, приравняв порядки S_{31} и S_{32} . При этом оптимальное значение порога, как и при выводе оценки сверху, равно

$$T = \sigma \sqrt{\ln 2^J} - 2\sigma \frac{\ln \ln 2^J}{\sqrt{\ln 2^J}}$$

и нижняя оценка функции потерь совпадает с верхней. Теорема доказана.

Литература

1. Sadasivan J., Mukherjee S., Seelamantula C. S. An optimum shrinkage estimator based on minimum-probability-of-error criterion and application to signal denoising // 39th IEEE Conference (International) on Acoustics, Speech and Signal Processing Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014. P. 4249–4253.
2. Sadasivan J., Mukherjee S., Seelamantula C. S. Signal denoising using the minimum-probability-of-error criterion // APSIPA Transactions Signal Information Processing, 2020. Vol. 9. Art. E3. 16 p.
3. Кудрявцев А. А., Шестаков О. В. Асимптотическое поведение порога, минимизирующего усредненную вероятность ошибки вычисления вейвлет-коэффициентов // Докл. Акад. наук, 2016. Т. 468. № 5. С. 487–491.
4. Кудрявцев А. А., Шестаков О. В. Асимптотически оптимальная пороговая обработка вейвлет-коэффициентов в моделях с негауссовым распределением шума // Докл. Акад. наук, 2016. Т. 471. № 1. С. 11–15.
5. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. — New York, NY, USA: Academic Press, 1999. 857 p.
6. Marron J. S., Adak S., Johnstone I. M., Neumann M. H., Patil P. Exact risk analysis of wavelet regression // J. Comput. Graph. Stat., 1998. Vol. 7. P. 278–309.
7. Jansen M. Noise reduction by wavelet thresholding. — Lecture notes in statistics ser. — New York, NY, USA: Springer Verlag, 2001. Vol. 161. 217 p.

Поступила в редакцию 28.09.2021

MINIMAX ESTIMATES OF THE LOSS FUNCTION BASED ON INTEGRAL ERROR PROBABILITIES DURING THRESHOLD PROCESSING OF WAVELET COEFFICIENTS

A. A. Kudryavtsev^{1,2} and O. V. Shestakov^{1,2,3}

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

²Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

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

Abstract: Noise reduction is one of the main tasks of signal processing. Wavelet transform-based methods for solving this problem have proven to be reliable and effective. Thresholding methods that use the idea of a sparse representation of a signal function in the space of wavelet coefficients have become especially popular. These methods use fast nonlinear algorithms that adapt to the local features of the signal being processed. The parameters of these algorithms are selected based on some quality criterion or minimization of a given loss function. Most often, the mean square risk is considered as a loss function. However, in some applications, minimizing the mean square risk does not always lead to satisfactory results. In the present paper, the authors consider the loss function based on the integral probabilities of errors in calculating the wavelet coefficients. For hard and soft thresholding methods, the boundaries for the optimal threshold values are calculated and the minimax order of the considered loss function in the class of Lipschitz-regular signals is estimated.

Keywords: wavelets; loss function; thresholding

DOI: 10.14357/19922264210402

Acknowledgments

This research has been supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow University “Brain, Cognitive Systems, Artificial Intelligence.”

References

1. Sadasivan, J., S. Mukherjee, and C. S. Seelamantula. 2014. An optimum shrinkage estimator based on minimum-probability-of-error criterion and application to signal denoising. *39th IEEE Conference (International) on Acoustics, Speech and Signal Processing Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 4249–4253.
2. Sadasivan, J., S. Mukherjee, and C. S. Seelamantula. 2020. Signal denoising using the minimum-probability-of-error criterion. *APSIPA Transactions Signal Information Processing* 9:E3. 16 p.
3. Kudryavtsev, A. A., and O. V. Shestakov. 2016. Asymptotic behavior of the threshold minimizing the average probability of error in calculation of wavelet coefficients. *Dokl. Math.* 93(3):295–299.
4. Kudryavtsev, A. A., and O. V. Shestakov. 2016. Asymptotically optimal wavelet thresholding in the models with non-Gaussian noise distributions. *Dokl. Math.* 94(3):615–619.
5. Mallat, S. 1999. *A wavelet tour of signal processing*. New York, NY: Academic Press. 857 p.
6. Marron, J. S., S. Adak, I. M. Johnstone, M. H. Neumann, and P. Patil. 1998. Exact risk analysis of wavelet regression. *J. Comput. Graph. Stat.* 7:278–309.
7. Jansen, M. 2001. *Noise reduction by wavelet thresholding*. Lecture notes in statistics ser. New York, NY: Springer Verlag. Vol. 161. 217 p.

Received September 28, 2021

Contributors

Kudryavtsev Alexey A. (b. 1978) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov

Moscow State University, 1-52 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; senior scientist, Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; nubigena@mail.ru

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

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК В МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ СЕТИ

Ю. Е. Малашенко¹, И. А. Назарова²

Аннотация: В рамках многопродуктовой сетевой модели анализируются недискриминирующие распределения ресурсов для передачи межузловых потоков различных видов между всеми парами узлов одновременно. При постановке и решении оптимизационных задач под ресурсом понимается суммарное значение пропускных способностей, выделяемых на всех ребрах, расположенных на всех маршрутах прохождения межузлового потока для данной пары корреспондентов. Сумма соответствующих реберных потоков трактуется как полная нагрузка на сеть, возникающая при передаче конкретного межузлового потока. При проведении вычислительных экспериментов последовательно решается цепочка лексикографически упорядоченных задач поиска маршрутов с равными нагрузками для равноправных пар узлов. На каждой итерации для многокомпонентной оценки функциональных возможностей системы используется вектор предельных значений совместно допустимых межузловых потоков. Метод позволяет за конечное число шагов найти финальное недискриминирующее максиминное распределение ресурсов, при котором достигается предельная загрузка всех ребер сети.

Ключевые слова: многопользовательская сеть; уравнительное максиминное распределение ресурсов; предельная загрузка сети; функциональные характеристики

DOI: 10.14357/19922264210403

1 Введение

Данная работа продолжает исследование проблемы распределения ресурсов и межузловых потоков в территориально распределенных многопользовательских системах связи [1]. Рассматривается модель сети, в которой межузловые потоки различных видов передаются между всеми парами узлов одновременно. Множества векторов совместно допустимых межузловых потоков предлагается использовать как многокритериальные оценки предельных функциональных возможностей сети. В рамках вычислительных экспериментов анализируется многокритериальная стратегия уравнительного распределения пропускной способности ребер. Цель управления при уравнительной стратегии состоит в получении равных результирующих значений суммарных реберных потоков для всех пар узлов-корреспондентов. Для вычислительных экспериментов используется итерационная процедура решения последовательности однопродуктовых задач поиска максимального потока для выделенной пары узлов при фиксированных нулевых значениях для всех остальных. На каждом шаге часть ресурса распределяется поровну между всеми корреспондентами, для которых предельное значение потока строго больше нуля. Разработанный метод позволяет за конечное число шагов найти финальное

распределение совместно допустимых дуговых потоков, при котором достигается предельная загрузка всех ребер сети [1].

В многопользовательских сетях при маршрутизации потоков требуется обеспечить несколько путей передачи для соединения корреспондентов [2–4]. Предлагаемый в настоящей работе метод позволяет на каждой итерации находить различные пути соединения, проходящие через минимальные разрезы при текущих значениях пропускной способности ребер. В [5–7] методы поиска лексикографического максимина используются для получения справедливых распределений при заданных требованиях пользователей. В настоящей работе на каждой итерации часть имеющегося ресурса распределяется строго поровну между парами, для которых удается найти хотя бы один путь передачи потока при заданных пропускных способностях. Предлагаемую в разд. 3 процедуру можно рассматривать как вариант метода возможных направлений [8] для поиска максиминного предельного распределения ресурсов между равноправными пользователями.

2 Математическая модель

Для описания многопользовательской сетевой системы связи используется следующая ма-

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, malash09@ccas.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, irina-nazar@yandex.ru

тематическая запись модели передачи многопродуктового потока. Сеть $G(\mathbf{d})$ задается множествами $\langle V, R, U, P \rangle$: узлов (вершин) сети $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n, \dots, v_N\}$; неориентированных ребер $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_E\}$. Ребро r_k соединяет концевые вершины v_{n_k} и v_{j_k} . Предполагается, что в сети отсутствуют петли и сдвоенные ребра. Каждому ребру r_k ставятся в соответствие две ориентированные дуги u_k и u_{k+E} из множества ориентированных дуг $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_{2E}\}$. Дуги $\{u_k, u_{k+E}\}$ определяют прямое и обратное направление передачи потока по ребру r_k между концевыми вершинами v_{n_k} и v_{j_k} .

В сети $G(\mathbf{d})$ рассматривается $M = N(N - 1)$ независимых, невзаимозаменяемых и равноправных междузловых потоков различных видов. По определению, каждой паре узлов-корреспондентов p_m из множества $P = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$ ставятся в соответствие вершина-источник с номером s_m , из которой входной поток m -го вида поступает в сеть, и вершина-приемник с номером t_m , из которой поток m -го вида покидает сеть.

Обозначим через z_m величину *междузлового* потока m -го вида, который поступает в сеть из узла с номером s_m и покидает ее из узла с номером t_m ; x_{mk} и $x_{m(k+E)}$ — величину потока m -го вида, который передается по дугам u_k и u_{k+E} согласно направлению передачи, $x_{mk} \geq 0$, $x_{m(k+E)} \geq 0$, $m = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, E}$; $S(v_n)$ — множество номеров исходящих дуг, по которым поток покидает узел v_n ; $T(v_n)$ — множество номеров входящих дуг, по которым поток поступает в узел v_n .

Во всех узлах сети $v_n \in V$, $n = \overline{1, N}$, для каждого вида потока должны выполняться условия сохранения потоков:

$$\sum_{i \in S(v_n)} x_{mi} - \sum_{i \in T(v_n)} x_{mi} = \begin{cases} z_m, & \text{если } v_n = v_{s_m}; \\ -z_m, & \text{если } v_n = v_{t_m}; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

$n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, $x_{mi} \geq 0$, $z_m \geq 0$.

Величина z_m равна входному междузловому потоку m -го вида, который пропускается от источника к приемнику пары p_m при распределении потоков x_{mi} по дугам сети.

Каждому ребру $r_k \in R$ приписывается неотрицательное число d_k , определяющее суммарный предельно допустимый поток, который можно передать по ребру r_k в обоих направлениях. В исходной сети компоненты вектора пропускных способностей $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_k, \dots, d_E)$ — наперед заданные положительные числа $d_k > 0$. Вектором \mathbf{d} опреде-

ляются ограничения на сумму потоков всех видов, передаваемых по ребру r_k одновременно:

$$\sum_{m=1}^M (x_{mk} + x_{m(k+E)}) \leq d_k, \quad x_{mk} \geq 0, \quad x_{m(k+E)} \geq 0, \quad k = \overline{1, E}. \quad (2)$$

В рамках данной модели пропускная способность ребер сети — вектор \mathbf{d} — трактуется как *ресурсное ограничение*, а сумма дуговых потоков рассматривается как показатель использования *ресурсов* сети при передаче междузловых потоков. Для z_m и x_{mi} , удовлетворяющих условиям (1) и (2), вычисляются суммарные потоки по ребрам сети:

$$y_m = \sum_{i=1}^{2E} x_{mi}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (3)$$

Поток y_m характеризует *нагрузку* на ребра сети при передаче заданного междузлового потока величины z_m из узла-источника s_m в узел-приемник t_m . Величина y_m показывает, какая суммарная пропускная способность сети используется для передачи междузлового потока z_m , при этом отношение

$$w_m = \frac{y_m}{z_m}, \quad m = \overline{1, M},$$

можно трактовать как удельные затраты ресурсов для передачи единичного потока m -го вида между узлами s_m и t_m при дуговых потоках x_{mi} .

Ограничения (1) и (2) задают множество допустимых значений компонент вектора междузловых потоков $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_m, \dots, z_M)$:

$$\mathcal{Z}(\mathbf{d}) = \{ \mathbf{z} \geq 0 \mid \exists \mathbf{x} \geq 0 : (\mathbf{z}, \mathbf{x}) \text{ удовлетворяют (1), (2)} \}.$$

Допустимые распределения реберных потоков принадлежат подмножеству

$$\mathcal{Y}(\mathbf{d}) = \{ \mathbf{y} \geq 0 \mid (\mathbf{z}, \mathbf{x}, \mathbf{y}) \text{ удовлетворяют (1)–(3)} \}.$$

В рамках модели при проведении вычислительных экспериментов определяется допустимое распределение междузловых потоков, для передачи которых всем парам узлов-корреспондентов выделяются одинаковые ресурсы и полностью используется пропускная способность всех ребер сети. Уравнительное распределение ресурсов находится в результате решения цепочки задач поиска сбалансированных нагрузок для всех узлов. Фактически решается последовательность лексикографически упорядоченных максиминных задач для распределения пропускной способности сети и получения близких значений нагрузки для разных пар.

3 Вычислительный эксперимент

Для поиска уравнивающего распределения ресурсов и балансировки нагрузки использовался метод, подробно описанный в [1]. При реализации вычислительной процедуры выполнение каждого шага t разбивается на несколько этапов. На предварительном этапе при заданных значениях пропускной способности ребер для каждой пары узлов определяются максимальный однопродуктовый межузловой поток $z_a^0(t)$, соответствующие дуговые потоки $(x_{ai}^0(t), x_{a(i+E)}^0(t))$, $i = \overline{1, E}$, и нагрузки $y_m^0(t)$, $m = \overline{1, M}$, согласно (3). На следующем этапе на основе найденных значений $y_m^0(t)$ вычисляются коэффициенты

$$\omega_m^0(t) = \frac{1}{y_m^0(t)} \text{ для всех } y_m^0(t) > 0, m = \overline{1, M}.$$

Определяется величина $\alpha^*(t) = \max_{\alpha} \alpha$ при условиях:

$$\alpha \sum_{m=1}^M \omega_m^0(t) [x_{mi}^0(t) + x_{m(i+E)}^0(t)] \leq d_i^*(t-1),$$

$$\alpha \geq 0, i = \overline{1, E}.$$

При найденном $\alpha^*(t)$ вычисляются текущие значения нагрузки на шаге t для всех пар $p_m \in P$

$$y_m^*(t) = \alpha^*(t) \omega_m^0(t) \sum_{i=1}^E [x_{mi}^0(t) + x_{m(i+E)}^0(t)] =$$

$$= \alpha^*(t) \sum_{i=1}^E \left(\frac{x_{mi}^0(t)}{y_m^0(t)} + \frac{x_{m(i+E)}^0(t)}{y_m^0(t)} \right) = \alpha^*(t),$$

$$m = \overline{1, M}.$$

На каждой текущей итерации нагрузки для всех пар-корреспондентов совпадают, т. е. для всех пар $p_m \in P$, таких что $y_m^0(t) > 0$, выделяются одинаковые ресурсы.

На заключительном этапе текущего шага t для всех ребер сети вычисляется остаточная пропускная способность

$$d_i^*(t) = d_i^*(t-1) -$$

$$- \alpha^*(t) \sum_{m=1}^M \omega_m^0(t) [x_{mi}^0(t) + x_{m(i+E)}^0(t)], i = \overline{1, E},$$

и осуществляется проверка условий:

- если после завершения очередного шага t окажется, что хотя бы для одного ребра $r_i \in R$ величина остаточной пропускной способности $d_i^*(t) > 0$, то происходит переход к следующему шагу $t + 1$;

- если $d_i^*(t) = 0$ для всех $i = \overline{1, E}$, то происходит останов, поскольку все пропускные способности ребер исчерпаны и сеть полностью загружена.

Таким образом на каждом шаге определенная часть имеющегося ресурса сети делится строго поровну среди всех корреспондентов, для которых существует маршрут передачи при текущих значениях пропускной способности.

Вычислительные эксперименты проводились на моделях сетевых систем, представленных на рис. 1. В каждой сети 69 узлов. Пропускные способности ребер — значения d_k — выбирались случайным образом из отрезка [900, 999] и совпадали для ребер, присутствующих в обеих сетях. В кольцевой сети пропускная способность каждого из добавленных ребер составляла 900.

На рис. 2 и 3 представлены финальные значения нагрузок в базовой и кольцевой сети. При построении диаграмм множество P было разделено на два непересекающихся подмножества: $P(R_{(+)})$ — пар «источник–приемник», соединенных ребром (смежных), и $P(R_{(-)}) = P \setminus P(R_{(+)})$ — всех остальных. На рис. 2, б и 3, б указаны распределения нагрузок $y_{(+)}(T)$ для пар из $P(R_{(+)})$, а на рис. 2, а и 3, а — для $P(R_{(-)})$. Все значения $y_{(-)}(T)$ упорядочиваются по величине от большего к меньшему (по невозрастанию). По горизонтальной оси

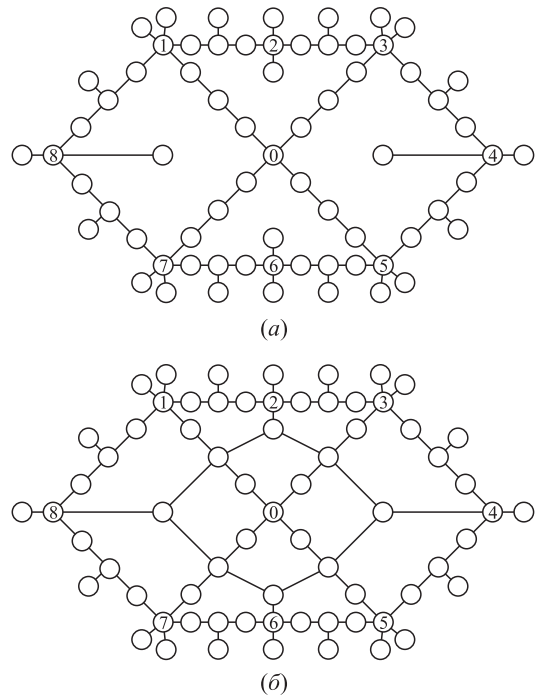


Рис. 1 Модели сетевых систем: (а) базовая сеть; (б) кольцевая сеть

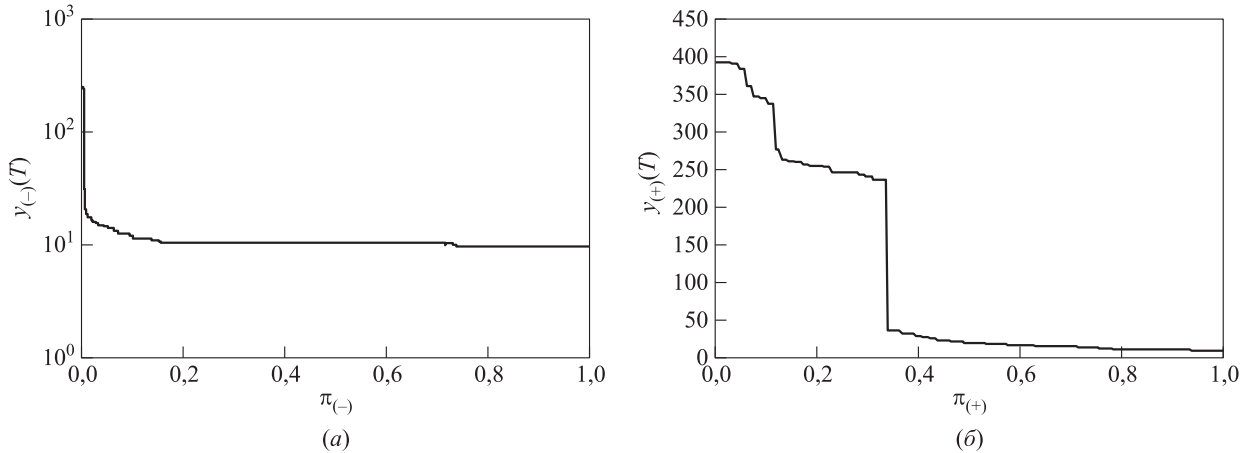


Рис. 2 Базовая сеть. Финальные распределения ресурсов: (а) несмежные пары; (б) смежные пары

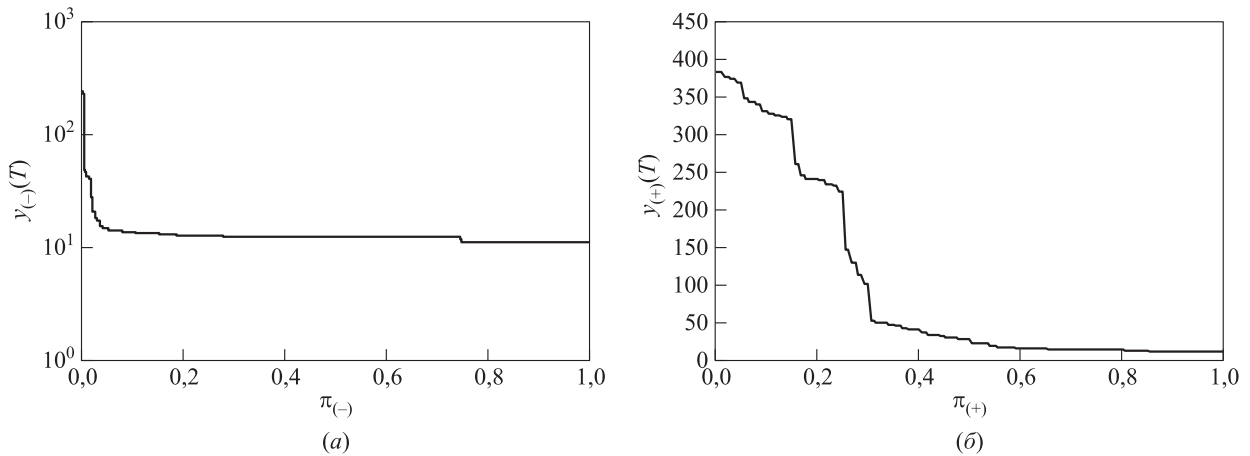


Рис. 3 Кольцевая сеть. Финальные распределения ресурсов: (а) несмежные пары; (б) смежные пары

указываются относительные порядковые номера корреспондентов в упорядоченных последовательностях: $\pi_{-}(m) = m/M_{-}$ для всех $p_m \in P(R_{(-)})$, $\pi_{+}(k) = k/M_{+}$ для всех $p_k \in P(R_{(+)})$, где $M_{-} = |P(R_{(-)})|$ и $M_{+} = |P(R_{(+)})|$ — число элементов в подмножествах $P(R_{(-)})$ и $P(R_{(+)})$ соответственно.

Диаграммы на рис. 2, а и 3, а свидетельствуют, что нагрузку для несмежных пар-корреспондентов удается распределить почти равномерно как в базовой, так и в кольцевой сети. Однако для 100 смежных пар финальные нагрузки отличаются почти на два порядка от средних значений. Суммарная пропускная способность в кольцевой сети на 11% больше, чем в базовой, а число смежных пар составляет 170. Численные значения на диаграммах различаются на 8%–10%, однако все графики наглядно демонстрируют указанные особенности в распределении нагрузок при предельной загрузке всех ребер сети.

Диаграммы на рис. 4 и 5 позволяют проследить, как на каждой итерации в ходе вычислительного эксперимента меняются суммарные нагрузки и соответствующие межузловые потоки.

На рис. 4 и 5 данные для нагрузок и потоков указаны отдельно: $y_{(+)}$ и $z_{(+)}$ — для смежных пар корреспондентов; $y_{(-)}$ и $z_{(-)}$ — для всех остальных пар узлов. По горизонтальным осям отложены суммарные значения для смежных пар узлов $y_{(+)}$ и $z_{(+)}$, а по вертикальной — для всех остальных корреспондентов $y_{(-)}$ и $z_{(-)}$. Жирные точки на графиках соответствуют суммарным значениям, достигнутым после завершения очередной итерации, следуют снизу вверх и слева направо согласно порядку их выполнения. Финальным значениям нагрузок $y_{(+)}(T)$ и $y_{(-)}(T)$, изображенным на рис. 2 и 3, соответствуют крайние точки в северо-восточной части рис. 4 и 5. На диаграмме рис. 4 справа можно проследить динамику изменения суммарных реберных нагрузок в базовой сети. Из рис. 4

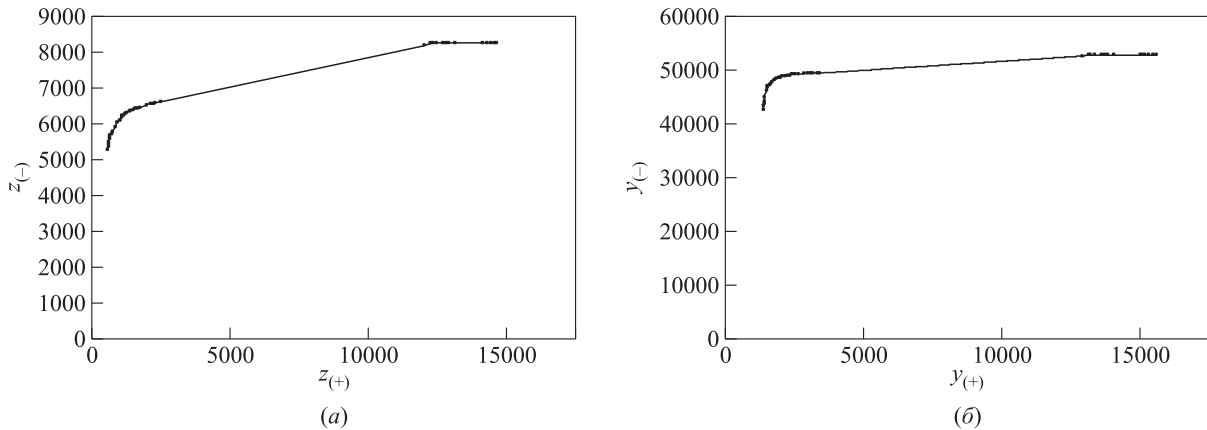


Рис. 4 Базовая сеть. Уравнительное распределение потоков (а) и ресурсов (б)

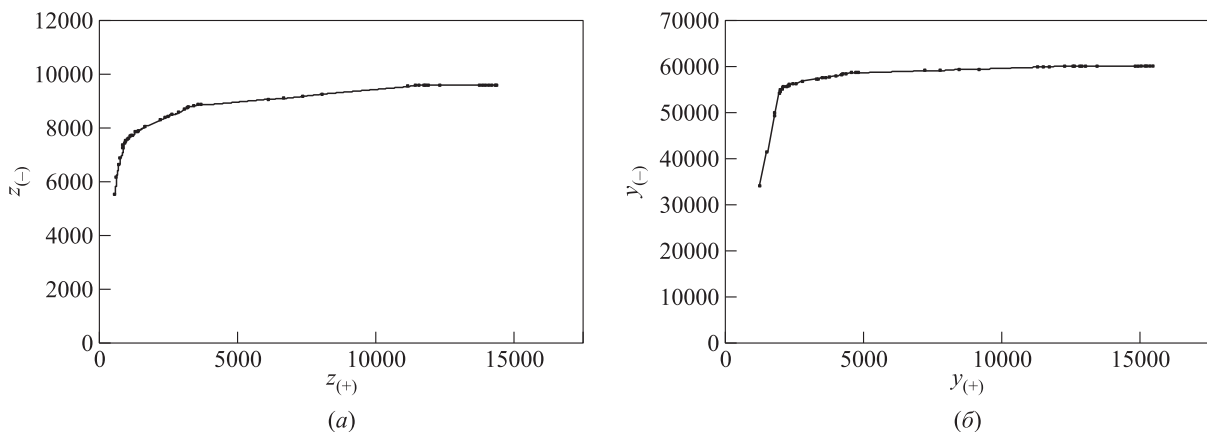


Рис. 5 Кольцевая сеть. Уравнительное распределение потоков (а) и ресурсов (б)

следует, что при пошаговом уравнительном распределении начиная с некоторой итерации резко меняются нагрузки, а следовательно, и доли ресурсов, которые выделяются корреспондентам из разных групп: $y_{(-)}$ и $y_{(+)}$.

В исходной базовой сети 150 смежных корреспондентов, а всех остальных — 4 500, соотношение числа различных межузловых потоков, передаваемых одновременно, — 1 : 30. На начальных итерациях расчетные агрегированные значения соответствуют как числу корреспондентов в каждой группе, так и уравнительным правилам распределения, которые используются на каждом шаге. На последующих шагах остаточная пропускная способность многих ребер становится равной нулю, сеть распадается на отдельные фрагменты и в результате для несмежных корреспондентов не остается путей соединения и значения дуговых потоков фиксируются на достигнутом уровне. На последних итерациях около 20%–25% остаточной суммарной пропускной способности распределяются только между смежными узлами.

Для примера рассмотрим диаграмму на рис. 4, которая относится к базовой сети. Суммарная пропускная способность D^* и соотношение числа пар-корреспондентов в подмножествах $P(R_{(-)})$ и $P(R_{(+)})$ составляют

$$D^* = \sum_{k=1}^E d_k = 68\,250; |P(R_{(-)})| : |P(R_{(+)})| = 30 : 1.$$

В точке излома на промежуточной итерации распределения ресурсов и текущих значений межузловых потоков:

$$y_{(-)}(t) : y_{(+)}(t) = 25 : 1; \quad z_{(-)}(t) : z_{(+)}(t) = 4 : 1.$$

При этом используется почти 75% суммарной пропускной способности всех ребер сети. Однако для финальных суммарных значений межузловых потоков получено соотношение $z_{(-)} : z_{(+)} = 9 : 5$. Таким образом, для 150 смежных пар финальные межузловые потоки почти в 2 раза превышают суммарный поток для 4 500 оставшихся корреспондентов. Финальные нагрузки, которые показывают, как используются ресурсы сети, для 3% смежных

пар-корреспондентов составляют 20% от пропускной способности.

4 Заключение

Описанные в разд. 3 вычислительные эксперименты проводились для оценки предельных возможностей многопользовательской сети и сравнения различных принципов балансировки нагрузок и распределения ресурсов. Для исследования требовалось многократное решение оптимизационных задач с векторным функционалом. При разработке вычислительной процедуры использовался метод последовательного лексикографического максимина для поиска недискриминирующего распределения ресурсов и сбалансированной нагрузки для всех равноправных пар-корреспондентов.

При реализации итерационной схемы остаточная пропускная способность распределялась поровну среди корреспондентов на всех доступных маршрутах соединения, проходящих через текущие минимальные разрезы на каждом шаге. Проведенные эксперименты показали, что только для 96% корреспондентов удастся поддерживать распределение в соответствии с заложенными принципами, а для 4% выделенные ресурсы и межузловые потоки могут отличаться на два порядка от средних значений.

Литература

1. Малашенко Ю. Е., Назарова И. А. Анализ равнодолевого и уравнительного распределения потоков при максимальной загрузке многопользовательской сети // Изв. РАН. ТиСУ, 2021. № 5. С. 85–93.
2. Baier G., Kohler E., Skutella M. The k-splittable flow problem // *Algorithmica*, 2005. Vol. 42. Iss. 3-4. P. 231–248.
3. Kabadurmus O., Smith A. E. Multicommodity k-splittable survivable network design problems with relays // *Telecommun. Syst.*, 2016. Vol. 62. Iss. 1. P. 123–133.
4. Bialon P. A randomized rounding approach to a k-splittable multicommodity flow problem with lower path flow bounds affording solution quality guarantees // *Telecommun. Syst.*, 2017. Vol. 64. Iss. 3. P. 525–542.
5. Georgiadis L., Georgatsos P., Floros K., Sartzetakis S. Lexicographically optimal balanced networks // *IEEE INFOCOM Ser.*, 2001. Vol. 2. P. 689–698.
6. Radunovic B., Le Boudec J.-Y. A unified framework for max-min and min-max fairness with applications // *IEEE ACM T. Network.*, 2007. Vol. 15. Iss. 5. P. 1073–1083.
7. Nace D., Doan L. N., Klopfenstein O., Bashllari A. Max-min fairness in multicommodity flows // *Comput. Oper. Res.*, 2008. Vol. 35. Iss. 2. P. 557–573.
8. Зойтендейк Г. Методы возможных направлений / Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1963. 175 с. (*Zoutendijk G. Methods of feasible directions.* — Amsterdam: Elsevier Publishing Co., 1960. 126 p.)

Поступила в редакцию 29.07.21

ANALYSIS OF PEAK LOAD DISTRIBUTION IN THE MULTIUSER NETWORK

Yu. E. Malashenko and I. A. Nazarova

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

Abstract: Within the framework of a multicommodity network model, nondiscriminatory distribution of the tantamount flows of various types transmitted between all pairs of nodes simultaneously is analyzed. When setting and solving optimization problems, the resource required by a certain source–receiver pair is treated as the sum of the capacity values of all edges located on all routes of this source–receiver flow. The sum of the corresponding edge flows is interpreted as the total load on the network occurring during a transmission of this internode flow. A nuclear-chain of lexicographically ordered problems of searching for routes with equal loads for source–receiver pairs is solved in computational experiments. At each iteration, a vector of peak values of jointly permissible internode flows is used for assessment of the system’s functionality. The method allows for a finite number of steps to find the final nondiscriminating maximin distribution of resources providing the peak load of all network edges.

Keywords: multiuser network; equalizing maximum peak load distribution; network peak load; functional characteristics

DOI: 10.14357/19922264210403

References

1. Malashenko, Yu. E., and I. A. Nazarova. 2021. Analysis of the equal share and equalitarian flow distributions under the peak load of the multi-user network. *J. Comput. Sys. Sc. Int.* 60(5):889–897.
2. Baier G., Kohler E., and M. Skutella. 2005. The k-splittable flow problem. *Algorithmica* 42(3-4):231–248.

3. Kabadurmus, O., and A. E. Smith. 2016. Multicommodity k-splittable survivable network design problems with relays. *Telecommun. Syst.* 62(1):123–133.
4. Bialon, P. 2017. A randomized rounding approach to a k-splittable multicommodity flow problem with lower path flow bounds affording solution quality guarantees. *Telecommun. Syst.* 64(3):525–542.
5. Georgiadis, L., P. Georgatsos, K. Floros, and S. Sartzetakis. 2001. Lexicographically optimal balanced networks. *IEEE INFOCOM Ser.* 2:689–698.
6. Radunovic, B., and J.-Y. Le Boudec. 2007. A unified framework for max-min and min-max fairness with applications. *IEEE ACM T. Network.* 15(5):1073–1083.
7. Nace, D., L. N. Doan, O. Klopfenstein, and A. Bashllari. 2008. Max-min fairness in multicommodity flows. *Comput. Oper. Res.* 35(2):557–573.
8. Zoutendijk, G. 1960. *Methods of feasible directions*. Amsterdam: Elsevier Publishing Co. 126 p.

Received July 29, 2021

Contributors

Malashenko Yuri E. (b. 1946) — 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; malash09@ccas.ru

Nazarova Irina A. (b. 1966) — 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 119333, Russian Federation; irina-nazar@yandex.ru

СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСКУРСИВНЫХ ОТНОШЕНИЙ В НАДКОРПУСНОЙ БАЗЕ ДАННЫХ КОННЕКТОРОВ*

О. Ю. Инькова¹, М. Г. Кружков²

Аннотация: Работа посвящена первым результатам разработки структурированных определений дискурсивных отношений на основе их оригинальной классификации, а также фиксации этих определений в Надкорпусной базе данных коннекторов (НБД). Авторы предлагают краткий обзор существующих подходов к определению дискурсивных отношений, а затем описывают принципы, на основе которых создаются структурированные определения дискурсивных отношений в НБД. Они включают (1) базовую семантическую операцию, на которую опирается логико-семантическое отношение (ЛСО): импликация, расположение на шкале времени, сравнение, соотнесение частного и общего или элемента и множества; (2) уровень, на котором может быть установлено ЛСО: пропозициональный уровень, уровень высказывания (иллокутивный), метаязыковой; (3) полярность, т. е. устанавливается ли ЛСО непосредственно между положениями вещей p и q , описанными в связываемых им фрагментах текста, или же при его интерпретации должны быть учтены также их отрицательные корреляты; (4) семантические и прагматические характеристики контекста. Приводятся примеры структурированных определений. Структурированные определения ЛСО фиксируются в структуре НБД с помощью набора взаимосвязанных таблиц, отражающих четыре перечисленных типа признаков. Кроме того, в рамках таблицы Семейство («семейства» различительных признаков) фиксируется информация о концептуальной близости некоторых наборов признаков. Описанная структура данных позволяет исчислять сходства и различия ЛСО — на сегодняшний день такая возможность не обеспечивается ни одним из существующих корпусов, аннотированных с точки зрения дискурсивных отношений.

Ключевые слова: надкорпусная база данных; логико-семантические отношения; коннекторы; аннотирование; фасетная классификация

DOI: 10.14357/19922264210404

1 Классификации и определения дискурсивных отношений: существующие подходы

Дискурсивные отношения и их роль в обеспечении связности текста занимают умы ученых разных областей знаний уже не один десяток лет. Напомним, что первые исследования, посвященные этому вопросу и выполненные с целью обеспечения автоматической обработки текста, появились в середине 1970-х гг. [1–3]. Первая и наиболее популярная сегодня классификация дискурсивных, или, согласно данной теории, риторических, отношений опубликована в 1988 г. [4]. Лингвисты сразу же увидели ее недостаток: риторические отношения определялись не на основе языкового материала и четких семантических критериев, а на основе интуиции пишущего и читающего. Это привело к тому, что количество отношений, выделяемых в рамках данного подхода, может насчитывать от 80

до 170 [5], что делает их трудно применимыми для аннотирования текста с точки зрения отношений связности.

С тех пор были предложены многочисленные классификации дискурсивных, или, в терминологии авторов статьи, логико-семантических, отношений (см. обзор в [6]), которые, однако, также имеют ряд недостатков. Причин тому несколько. Прежде всего, неясным остается основание классификаций, которое позволило бы определить семантическую близость отношений и возможность их объединения на этой основе в классы; см., например, классификацию, используемую в Пенсильванском аннотированном корпусе, которая регулярно пересматривается: последний ее вариант [7] значительным образом отличается от версии 2.0 [8]; подробнее о различиях между двумя вариантами см. [9].

Еще один недостаток существующих классификаций заключается в том, что многие из них

* Исследование выполнено с использованием ЦКП «Информатика» ФИЦ ИУ РАН.

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

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, magnit75@yandex.ru

определяют отношения на основе семантики показателя (коннектора), который считается прототипическим. Однако, с одной стороны, критерии выбора этого прототипического показателя неочевидны (см., например, в английском языке выбор *but* для отношения Контраст в [10, 11] при наличии *by contrast*). С другой стороны, хорошо известно, что коннекторы многозначны и могут выражать несколько отношений (ср. коннектор *если... то*: *Если завтра будет тепло, то поедем купаться на озеро* — условные отношения; *Если цена на нефть осталась прежней, то газ сильно подорожал* — сопоставительные отношения). Кроме того, дискурсивные отношения могут не иметь показателя; ср. *Будет тепло, поедем купаться на озеро*.

Наконец, существующие классификации не имеют объяснительной силы. В частности, они не могут объяснить, почему коннектор может выражать определенный набор отношений, а в сопоставительном ключе — почему коннектор одного семантического класса может служить переводным эквивалентом коннектора другого семантического класса. Например, в (1) показатель отношения переформулирования *то есть* переведен показателем альтернативы *ou* 'или'.

- (1) И в эту минуту ему на голову упал сценический противовес. *То есть*, попросту говоря, брезентовый мешок килограммов на двенадцать. — *Au même instant un contrepoids de scène lui tomba sur la tête. Ou, pour parler plus simplement, un sac de toile d'une bonne douzaine de kilos.* [С. Довлатов. Иностранка (1986) — перевод Jacques Michaut-Paterno (2001)]

Чтобы отчасти преодолеть перечисленные недостатки, в работе [12] предлагается определять отношения на основе набора семантических признаков. Это позволяет увидеть общие семантические свойства у отношений, которые в разных классификациях носят разные названия (подробнее см. [13]). Число классифицирующих признаков¹ оказывается, однако, недостаточным для описания многообразия дискурсивных отношений, поскольку не-

которые отношения имеют одинаковый набор признаков даже после введения дополнительных классифицирующих признаков [14]. Так, отношения спецификации (*Он любит книги, в частности детективы*) и генерализации (*Он любит детективы и вообще любит читать*) имеют одинаковый набор не только основных признаков (положительная полярность, аддитивная операция, объективный/субъективный источник связности, признак порядка не применяется), но и дополнительный (*specifity* — 'специфичность').

2 Классификация дискурсивных отношений, используемая в Надкорпусной базе данных коннекторов

Классификация, используемая в НБД, разработанной в ИПИ ФИЦ ИУ РАН², принципиальным образом отличается от существующих.

Во-первых, в ее основу положены четыре базовые семантические операции, или механизма, на которые опирается то или иное ЛСО: импликация, расположение на шкале времени, сравнение, сопоставление частного и общего или элемента и множества.

Во-вторых, классификация различает уровни, на которых может быть установлено ЛСО: пропозиционный уровень, уровень высказывания (иллокутивный), метаязыковой; подробнее см. [13].

Каждое ЛСО может, следовательно, определяться на основе этих двух критериев, к которым добавляется критерий, характеризующий ЛСО, основанные на импликации и сравнении: полярность, т. е. устанавливается ли ЛСО непосредственно между положениями вещей *p* и *q*, описанными в связываемых им фрагментах текста, или же при его интерпретации должны быть учтены также их отрицательные корреляты $\neg p$ и $\neg q$. Наконец, учитываются семантические и прагматические характеристики контекста.

¹Классифицирующих признаков всего четыре: (1) полярность (т. е. необходимо ли для интерпретации отношения привлекать отрицание одного из соединяемых им положений вещей; например, интерпретация уступительных отношений опирается на причинную цепочку, которая считается нормальным развитием событий: *Хотя погода была хорошая, купаться мы не поехали* предполагает, что при хорошей погоде *мы едем купаться*, но в данном случае этого не произошло); (2) базовая операция (аддитивная или причинная; например, как было показано, причинная базовая операция лежит в основе уступительных отношений); (3) источник связности (т. е. насколько говорящий вовлечен в устанавливаемое отношение; ср. два вида отношения альтернативы: объективное *При высокой температуре следует вызвать скорую или обратиться к лечащему врачу* и субъективное *Замолчи, или я тебя выгоню*, при котором говорящий предполагает, что ситуация *я тебя выгоню* является нежелательной для слушающего); (4) порядок следования фрагментов текста (этот признак применяется только к группе отношений, основанных на причинной базовой операции, и позволяет различать следственные отношения, при которых следствие как хронологически, так и в тексте следует за причиной, и причинные отношения, при которых в тексте причина следует за следствием; ср.: *Маша заболела, следовательно она не придет и Маша не придет, потому что заболела*). Подробнее см. [13].

²Подробнее о структуре НБД, ее возможностях и результатах, полученных с ее использованием, см., например, [15, 16]. Представительный фрагмент НБД доступен по адресу: <http://a179.frccsc.ru/RFH41002/main.aspx>.

Таблица 1 Примеры структурированных определений ЛСО

Перифрастическое переформулирование	Метаязыковая альтернатива
– операция сравнения, устанавливающая сходство p и q	– операция сравнения, устанавливающая несходство p и q
– метаязыковой уровень	– метаязыковой уровень
– p — описание положения вещей r	– p — возможное описание положения вещей r
– q — описания того же положения вещей r	– q — возможное описание того же положения вещей r
– p и q имеют одинаковый экстенционал	– говорящий предлагает сделать выбор между p и q

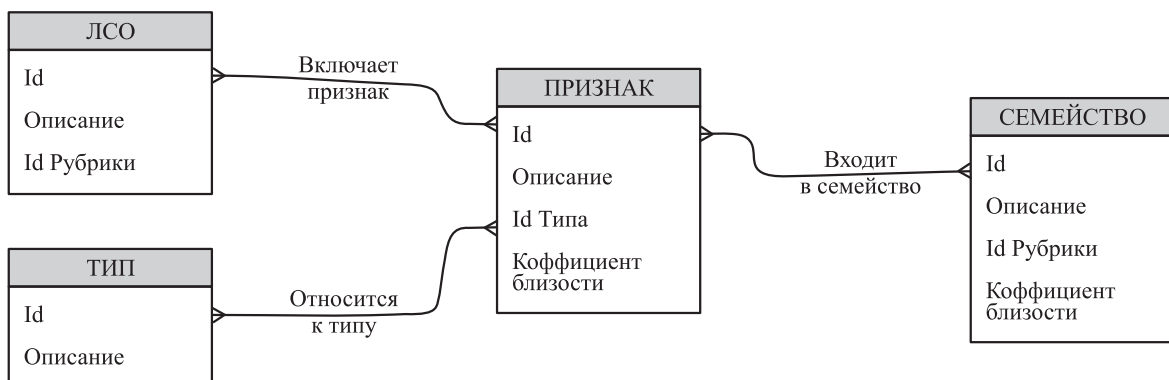
Такая концепция классификации дискурсивных отношений позволяет описывать их при помощи структурированных определений, представляющих собой набор различительных признаков. Два таких определения — перифрастического переформулирования и метаязыковой альтернативы — даны в табл. 1 (другие определения см. в [9]).

Из определений видно, что эти два отношения имеют несколько общих семантических признаков: оба они установлены в результате операции сравнения, на метаязыковом уровне, т. е. не между положениями вещей, а между описаниями одного и того же положения вещей r . Различия между ними заключаются в том, что в случае переформулирования операция сравнения устанавливает сходство описаний, а при альтернативе — несходство, поэтому говорящий предлагает сделать между ними выбор. Сходные семантические признаки объясняют, почему показатели переформулирования и метаязыковой альтернативы могут заменять друг друга без нарушения связности текста (ср. вариант (2) русского оригинала примера (1) с *или*), а при переводе с одного языка на другой — переводить друг друга, как в примере (1).

- (2) И в эту минуту ему на голову упал сценический противовес. *Или*, попросту говоря, брезентовый мешок килограммов на двенадцать.

3 Структурированные определения в программном обеспечении Надкорпусной базы данных

Структурированные определения ЛСО фиксируются в структуре НБД с помощью набора взаимосвязанных таблиц (см. соответствующий фрагмент схемы НБД на рисунке). В таблице ЛСО фиксируются неформальные описания ЛСО с отсылками к соответствующим рубрикам фасетной классификации, используемым при аннотации переводных соответствий в НБД коннекторов. В таблице **Признак** содержатся различительные признаки, из комбинаций которых складываются структурированные определения каждого ЛСО. Различительные признаки могут относиться к одному из типов, определения которых содержатся в таблице **Тип**. В настоящее время в этой таблице зафиксированы четыре типа признаков: (1) базовая операция, лежащая в основе ЛСО; (2) языковой уровень, на котором устанавливается ЛСО; (3) дополнительные семантические/прагматические особенности; (4) полярность аргументов ЛСО. При необходимости в дальнейшем набор типов признаков может быть расширен.



Структурированное описание ЛСО (фрагмент схемы НБД)

Таблица 2 Сопоставление структурированных описаний ЛСО в структуре НБД

ЛСО «Пропозициональное замещение»		ЛСО «Замещение по дескриптивной адекватности»	
Признак	Тип	Признак	Тип
операция сравнения, устанавливающая несходство p и q	<i>базовая операция</i>	операция сравнения, устанавливающая несходство p и q	<i>базовая операция</i>
пропозициональный уровень	<i>уровень</i>	метаязыковой уровень	<i>уровень</i>
p — положение вещей, осуществление которого можно было бы ожидать	<i>семантика/прагматика</i>	p — описание положения вещей r , которое можно было бы ожидать	<i>семантика/прагматика</i>
q — положение вещей, не соответствующее ожиданиям	<i>семантика/прагматика</i>	q — описание того же положения вещей r , не соответствующее ожиданиям	<i>семантика/прагматика</i>
p отвергается, принимается q	<i>полярность</i>	p отвергается, принимается q	<i>полярность</i>

Роль таблицы **Семейство** («семейства» различных признаков) состоит в том, чтобы фиксировать информацию о концептуальной близости некоторых наборов признаков. В то время как описания различительных признаков могут не совпадать, они могут включать в себя общие концептуальные компоненты, благодаря которым различные ЛСО, описываемые этими формально не совпадающими признаками, могут оказываться семантически или функционально близкими. Например, семейство признаков «Семантика исключения» включает в себя следующий набор признаков: (1) Y содержит указание на элемент q , исключаемый из множества P ; (2) Y содержит указание на элемент q , который надо исключить, чтобы признать истинным p ; (3) p верно, только если исключить осуществление q ¹. Таким образом, сходство ЛСО может определяться не только на основе наличия полностью совпадающих признаков, но и на основе принадлежности признаков различных ЛСО к одному и тому же «семейству» признаков.

Описанная структура данных уже позволяет выделять функциональные и концептуальные группы ЛСО, а также в предварительном приближении оценивать степень близости различных ЛСО. Например, в табл. 2 представлены структурированные описания ЛСО «Пропозициональное замещение» и «Замещение по дескриптивной адекватности». Каждое из этих ЛСО описывается 5 признаками, из которых 2 совпадают, а еще по 2 признака каждого отношения относятся к общему семейству «компонент ожидания» (признаки, относящиеся к типу *семантика/прагматика*). Таким образом, 4 из 5 компонентов описания обоих ЛСО оказываются общими или концептуально близкими, что свидетельствует о значительной близости отношений.

Кроме того, при ближайшем рассмотрении становится очевидно, что не все различительные признаки в равной мере влияют на близость описываемых ими ЛСО. Например, признаки, относящиеся к типу *уровень*, вряд ли могут считаться определяющими при выяснении близости соответствующих отношений. В связи с этим в таблицах **Признак** и **Семейство** также предусмотрены поля «Коэффициент близости», в которых в будущем предполагается фиксировать весовые коэффициенты, позволяющие более точно определять степень близости между ЛСО. Значения этих весовых коэффициентов у семейств и/или отдельных признаков будут соответствовать степени влияния соответствующих признаков (или признаков, входящих в данное семейство) на близость описываемых ими отношений.

4 Заключение

Используемые в НБД структурированные определения ЛСО имеют, как было показано, ряд преимуществ перед существующими. Во-первых, они включают достаточный набор классифицирующих признаков, позволяющих описывать ЛСО. Это, в свою очередь, позволяет описывать семантические свойства ЛСО вне зависимости от семантики показателей, которые его могут выражать. Во-вторых, как классификация ЛСО, так и их определения обладают объяснительной силой. Они позволяют, в частности, объяснить, почему один и тот же показатель может выражать несколько ЛСО и каких именно, а на основе семантических и прагматических особенностей фрагментов текста определить тот набор ЛСО, которые могут быть между ними установлены. Наконец, фиксация структурированных определений ЛСО в структуре НБД с помощью

¹ В описаниях признаков строчные литеры p и q представляют собой пропозициональные компоненты, связываемые данным ЛСО, а заглавные литеры P , Q , X и Y представляют собой отсылки к множествам, задействованным в ЛСО.

набора взаимосвязанных таблиц позволяет количественно оценивать сходства и различия ЛСО. На сегодняшний день такая возможность не обеспечивается ни одним из существующих корпусов, аннотированных с точки зрения дискурсивных отношений.

Литература

1. *Hobbs J. R.* A computational approach to discourse analysis. — New York, NY, USA: Department of Computer Science, City College, City University of New York, 1976. Research Report 76-2. P. 28–38.
2. *Hobbs J. R.* Why is discourse coherent? — Menlo Park, CA, USA: SRI International, 1978. SRI Technical Note 176. 44 p.
3. *Hobbs J. R.* Coherence and coreference // *Cognitive Sci.*, 1979. Vol. 3. No. 1. P. 67–90.
4. *Mann W. C., Thompson S. A.* Rhetorical structure theory: Towards a functional theory of text organization // *Text*, 1988. Vol. 8. No. 3. P. 243–281.
5. *Knott A., Dale R.* Using linguistic phenomena to motivate a set of coherence relations // *Discourse Process.*, 1994. Vol. 18. No. 1. P. 35–62.
6. *Гончаров А. А.* Классификации внутритекстовых отношений: основания и принципы структурирования // *Вопросы языкознания*, 2021. № 3. С. 97–119.
7. *Webber B., Prasad R., Lee A., Joshi A.* The Penn Discourse Treebank 3.0 annotation manual, 2019. 81 p. <https://catalog.ldc.upenn.edu/docs/LDC2019T05/PDTB3-Annotation-Manual.pdf>.
8. PDTB Research Group. The Penn Discourse Treebank 2.0 annotation manual. — Philadelphia, PA, USA: Institute for Research in Cognitive Science, University of Pennsylvania, 2008. Technical Report IRCS-08-01. 99 p. <https://www.seas.upenn.edu/~pdtb/PDTBAPI/pdtb-annotation-manual.pdf>.
9. *Инькова О. Ю.* Определения дискурсивных отношений: опыт Надкорпусной базы данных коннекторов // *Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По мат-лам ежегодной Междунар. конф. «Диалог».* — М.: РГГУ, 2021. Вып. 20(27). С. 328–338.
10. *Rudolph E.* Contrast: Adversative and concessive expressions on sentence and text level. — Berlin/Boston: Walter de Gruyter, 1996. 564 p.
11. *Fraser B.* An account of discourse markers // *International Review Pragmatics*, 2009. Vol. 1. No. 2. P. 293–320.
12. *Sanders T., Spooren W., Noordman L.* Toward a taxonomy of coherence relations // *Discourse Process.*, 1992. Vol. 15. No. 1. P. 1–35.
13. *Инькова О. Ю.* Логико-семантические отношения: проблемы классификации // *Связность текста: ме-реологические логико-семантические отношения.* — М.: ЯСК, 2019. С. 11–98.
14. *Sanders T., Demberg V., Hoek J., Scholman M., Asr F. T., Zufferey S., Evers-Vermeul J.* Unifying dimensions in coherence relations: How various annotation frameworks are related // *Corpus Linguist. Ling.*, 2021. Vol. 17. No. 1. P. 1–71.
15. Семантика коннекторов: контрастивное исследование / Под. ред. О. Ю. Иньковой. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2018. 368 с.
16. Структура коннекторов и методы ее описания / Под. ред. О. Ю. Иньковой. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2019. 316 с.

Поступила в редакцию 29.09.21

STRUCTURED DEFINITIONS OF DISCOURSE RELATIONS IN THE SUPRACORPORA DATABASE OF CONNECTIVES

O. Yu. Inkova and M. G. Kruzhkov

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

Abstract: The paper presents initial outcomes resulting from development of structured definitions of discourse relations based on novel classification principles and describes how these definitions are captured in the Supracorpora Database of Connectives (SCDB). The authors provide an overview of existing approaches to definition of discourse relations and propose novel principles for capturing structured definitions of discourse relations in the SCDB based on several aspects which include (i) the basic semantic operation that the logical-semantic relation (LSR) is based on: implication, relative timeline positioning, comparison, and correlation between general and specific, between an element and a set; (ii) the linguistic level that the LSR is established on: propositional level, utterance (illocutionary) level, and metalinguistic level; (iii) the polarity, i. e., whether the LSR is established directly between the provisions p and q featuring in the text or whether their negative correlates should also be considered in the relation interpretation; and (iv) the semantic and pragmatic features of the context. The paper provides some examples of such structured definitions. The structured definitions are captured within the SCDB by a set of interrelated tables. In addition, the

“Family” table is introduced to offer information about conceptual closeness of some sets of classification features. The proposed structure allows researchers to access similarities and distinctions between various LSRs — as of today, this functionality is not implemented in any of the existing corpora that include annotation of discourse relations.

Keywords: supracorpora database; logical-semantic relations; connectives; annotation; faceted classification

DOI: 10.14357/19922264210404

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. Hobbs, J. R. 1976. A computational approach to discourse analyses. New York, NY: Department of Computer Science, City College, City University of New York. Research Report 76-2. 28–38.
2. Hobbs, J. R. 1978. Why is discourse coherent? Menlo Park, CA: SRI International. SRI Technical Note 176. 44 p.
3. Hobbs, J. R. 1979. Coherence and coreference. *Cognitive Sci.* 3(1):67–90.
4. Mann, W. C., and S. A. Thompson. 1988. Rhetorical structure theory: Towards a functional theory of text organization. *Text* 8(3):243–281.
5. Knott, A., and R. Dale. 1994. Using linguistic phenomena to motivate a set of coherence relations. *Discourse Process.* 18(1):35–62.
6. Goncharov, A. A. 2021. Klassifikatsii vnutritekstovyykh otnosheniy: Osnovaniya i printsipy strukturirovaniya [Classification of intratextual relations: Bases and structural principles]. *Voprosy yazykoznaniya* [Topics in the Study of Language] 3:97–119.
7. Webber, B., R. Prasad, A. Lee, and A. Joshi. 2019. The Penn Discourse Treebank 3.0 Annotation Manual. Available at: <https://catalog.ldc.upenn.edu/docs/LDC2019T05/PDTB3-Annotation-Manual.pdf> (accessed October 29, 2021).
8. PDTB Research Group. 2008. The Penn Discourse Treebank 2.0 Annotation Manual. Philadelphia, PA: Institute for Research in Cognitive Science, University of Pennsylvania. Technical Report IRCS-08-01. 99 p. Available at: <https://www.seas.upenn.edu/~pdtb/PDTBAPI/pdtb-annotation-manual.pdf> (accessed October 29, 2021).
9. Inkova, O. Yu. 2021. Opredeleniya diskursivnykh otnosheniy: opyt Nadkorpusnoy bazy dannykh konnektorov [Definition of discourse relations: The case of the Supracorpora Database of Connectives]. *Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nye tekhnologii: po mat-lam Mezhdunar. konf. "Dialog"* [Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Papers from the Annual Conference (International) “Dialogue”]. Moscow: RSHI. 20(27):328–338.
10. Rudolph, E. 1996. *Contrast: Adversative and concessive expressions on sentence and text level*. Berlin/Boston: Walter de Gruyter. 564 p.
11. Fraser, B. 2009. An account of discourse markers. *International Review Pragmatics* 1(2):293–320.
12. Sanders, T., W. Spooren, and L. Noordman. 1992. Toward a taxonomy of coherence relations. *Discourse Process.* 15(1):1–35.
13. Inkova, O. Yu. 2019. Logiko-semanticheskie otnosheniya: Problemy klassifikatsii [Logical-semantic relations: Classification problems]. *Svyaznost' teksta: mereologicheskie logiko-semanticheskie otnosheniya* [Text coherence: Mereological logical semantic relations]. Moscow: LRC Publishing House. 11–98.
14. Sanders T., V. Demberg, J. Hoek, M. Scholman, F. T. Asr, S. Zufferey, and J. Evers-Vermeul. 2021. Unifying dimensions in coherence relations: How various annotation frameworks are related. *Corpus Linguist. Ling.* 17(1):1–71.
15. In'kova, O. Yu., ed. 2018. *Semantika konnektorov: Kontrastivnoe issledovanie* [Semantics of connectives: Contrastive study]. Moscow: TORUS PRESS. 368 p.
16. In'kova, O. Yu., ed. 2019. *Struktura konnektorov i metody ee opisaniya* [Structure of connectives and methods of its description]. Moscow: TORUS PRESS. 316 p.

Received September 29, 2021

Contributors

Inkova Olga Yu. (b. 1965) — Doctor of Science in philology, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; olyainkova@yandex.ru

Kruzhkov Mikhail G. (b. 1975) — senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; magnit75@yandex.ru

СОЗДАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОДНОСЕКТОРНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ДИСКРЕТНЫМ ВРЕМЕНЕМ И АНАЛИЗ СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

П. В. Шнурков¹

Аннотация: Работа посвящена созданию стохастической динамической модели оптимального управления с дискретным временем в рамках односекторной экономической системы. За основу принята классическая детерминированная динамическая модель экономической системы, в которой производится один универсальный продукт. Этот продукт делится на инвестиционную и потребительскую составляющие. Управление системой заключается в определении соотношения между этими составляющими. В настоящей работе предполагается, что основные параметры системы зависят от некоторого случайного фактора, который характеризует влияние внешней среды. Указанный фактор описывается однородной цепью Маркова с конечным множеством состояний и заданной матрицей вероятностей перехода. В работе построена стохастическая модель эволюции рассматриваемой системы, которая представляет собой двумерный марковский процесс с дискретным временем. По своему экономическому содержанию первая компонента этого процесса представляет собой удельный капитал, а вторая — состояние внешнего случайного фактора. Параметр управления, или решение, в каждый момент времени представляет собой долю произведенного удельного продукта, направляемую на инвестирование. Описано рекуррентное задание стоимостного аддитивного показателя эффективности управления. Теоретическую основу решения поставленной задачи оптимального управления составляет метод динамического программирования. Получена система функциональных уравнений Беллмана, решением которой является оптимальная стратегия управления.

Ключевые слова: задача оптимального управления с дискретным временем; стохастическая динамическая односекторная экономическая модель; управляемая двумерная цепь Маркова; метод динамического программирования для задачи управления с дискретным временем; уравнения Беллмана

DOI: 10.14357/19922264210405

1 Введение

В литературе по математической экономике хорошо известна односекторная динамическая детерминированная модель [1, 2]. В рамках этой модели предполагается, что в соответствующей экономической системе производится один универсальный продукт, измеряемый в условных денежных единицах. Произведенный продукт делится на две части: инвестиции и потребление. В качестве основных параметров модели выступают общий объем произведенного продукта, объем производственных фондов (капитал), объем трудовых ресурсов (рабочая сила), объем инвестиций и объем потребления. Все эти параметры имеют динамический характер, т. е. зависят от времени. Обычно рассматриваются удельные варианты указанных параметров, определяемые как отношение их общего объема к объему трудовых ресурсов.

В стандартной модели предполагается, что состоянием исследуемой системы является удельный объем производственных фондов, который часто называют фондовооруженностью, или удельным капиталом. Роль параметра управления играет удельное потребление. Удельный объем производства, или производительность труда, определяется как заданная функция от удельного капитала. Динамика состояния системы описывается дифференциальным уравнением, в котором отражается выбытие основных фондов за счет их физического или морального устаревания и их обновление за счет инвестирования в систему части произведенного продукта. Таким образом, возникает динамический управляемый процесс в смысле классической теории управления [3, 4].

Для постановки задачи оптимального управления вводится целевой функционал, или показатель эффективности. В стандартном варианте этот

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

функционал имеет интегральный характер и по своему экономическому содержанию представляет собой некую накопленную полезность, которая является заданной функцией от удельного потребления.

Полученная задача оптимального управления с непрерывным временем хорошо изучена. Подробное изложение этой теории приведено в уже упомянутых классических изданиях [1, 2], а также в современных монографиях [5–7].

Гораздо менее известна соответствующая задача оптимального управления с дискретным временем. Основное динамическое соотношение для состояния системы (удельного капитала) приведено в [2], по математической форме оно представляет собой разностное уравнение. Там же отдельно приведено представление для целевого функционала. Отметим, что в обоих случаях это сделано только в подстрочных примечаниях и никакого математического анализа соответствующей задачи оптимального управления не проводилось.

В работе [8] была рассмотрена задача оптимального управления в детерминированной динамической односекторной экономической модели с дискретным временем. Для решения поставленной задачи был использован метод динамического программирования Беллмана. По аналогии с исследованием классической общей задачи оптимального управления с дискретным временем [3, гл. 6] получено уравнение Беллмана. Разработан и подробно описан численный алгоритм решения этого уравнения, который позволяет определить оптимальную стратегию управления.

Настоящее исследование посвящено созданию стохастической динамической односекторной экономической модели с дискретным временем. В качестве исходной конструкции взята упомянутая выше детерминированная динамическая односекторная экономическая модель. Предполагается, что в новой модели основные параметры системы зависят от некоторого внешнего случайного фактора, который описывается однородной цепью Маркова. Получены основные динамические соотношения, описывающие поведение системы. Определено понятие аддитивного стоимостного функционала, связанного с построенным случайным процессом. Поставлена задача оптимального управления. Выведена система уравнений Беллмана, решением которой является оптимальная стратегия управления.

Начнем с краткого описания исходной детерминированной динамической односекторной модели экономической системы. При этом описании будем следовать классической монографии [2] с некоторыми изменениями, принятыми в [8].

2 Описание детерминированной односекторной модели в экономике

Рассмотрим динамическую экономическую систему, при описании которой параметр времени считается дискретным и принимает конечное число значений: $n \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$, $N < \infty$. Таким образом, эволюция системы происходит на конечном интервале времени.

Введем обозначения для основных характеристик модели: y_n — удельный объем произведенного продукта (производительность труда); k_n — удельный объем производственных фондов (фондовооруженность, или удельный капитал); c_n — удельный объем потребления (потребительский фонд), $n \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$.

Будем предполагать, что $y_h = f(k_n)$, $n \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$, где $f(\cdot)$ — заданная функция. В стандартной детерминированной модели дополнительно предполагается, что $f(\cdot)$ — неотрицательная, неубывающая и выпуклая вверх функция, $f(0) = 0$. Эти аналитические свойства имеют реальное экономическое содержание [1, 2].

Поскольку произведенный продукт делится только на инвестиции и потребление, величина $y_n - c_n = f(k_n) - c_n$ представляет собой удельный объем инвестиций, $n \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$.

Обозначим через $\rho_n = (f(k_n) - c_n)/f(k_n)$ долю удельного продукта, направляемую на инвестирование. Соответственно, $1 - \rho_n = c_n/f(k_n)$ есть доля удельного продукта, направляемого на потребление, $n \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$. По определению, $\rho_n \in U = [0, 1]$, $n \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$.

В детерминированной модели, рассматриваемой в работе [8], предполагается, что последовательность значений удельного капитала $k = (k_0, k_1, \dots, k_{N-1}, k_N)$ описывает состояние системы, а последовательность значений параметра $\rho = (\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_{N-1})$ — управления, или решения, принимаемые в соответствующие моменты времени.

Динамика модели, т.е. изменение состояний под воздействием принимаемых решений, описывается следующим соотношением:

$$k_{n+1} = \varphi_n(k_n, \rho_n) = (1 - \lambda_n)k_n + \rho_n f(k_n), \quad n \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}. \quad (1)$$

Коэффициент λ_n , $0 < \lambda_n < 1$, в правой части (1) характеризует выбывание основных фондов системы из процесса производства за счет физического и морального старения, все значения коэффици-

ента λ_n , $n \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$, предполагаются заданными.

Аналитическое представление для показателя эффективности управления сформировано по аналогии с соответствующей моделью [2]. Подробные пояснения к его экономическому содержанию приведены в [8].

Теперь можно сформулировать задачу оптимального управления в исходной детерминированной модели как экстремальную задачу с ограничениями:

$$\left. \begin{aligned} I(k, \rho) &= \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{1}{1+\gamma} \right)^n V((1-\rho_n)f(k_n)) + \\ &\quad + \psi(k_N) \rightarrow \max; \\ k_{n+1} &= \varphi_n(k_n, \rho_n) = (1-\lambda_n)k_n + \rho_n f(k_n), \\ &\quad n = 0, 1, \dots, N-1; \\ k_0 &= a_0; \\ \rho_n &\in U = [0, 1], \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \end{aligned} \right\} (2)$$

Экстремальная задача с дискретным временем (2) известна в теории оптимального управления. Она представляет собой частный случай общей задачи, определенной на заданном конечном интервале времени, со смешанным целевым функционалом и закрепленным левым концом траектории [3]. Для решения такой задачи можно использовать метод динамического программирования Беллмана. В работе [8] получена система уравнений Беллмана для этой задачи и разработан алгоритм численного решения указанной системы и определения оптимальной стратегии управления.

3 Разработка стохастической динамической модели односекторной экономической системы

Возьмем за основу динамическую односекторную экономическую модель с дискретным временем, описанную в предыдущем разделе. Предположим, что некоторые характеристики модели зависят от случайного фактора, характеризующего состояние внешней среды (или экономической конъюнктуры рынка). Случайный фактор описывается цепью Маркова $\{\eta_n\}_{n=0}^N = \{\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_n, \dots, \eta_N\}$, заданной на вероятностном пространстве (Ω, \mathcal{A}, P) и конечном периоде времени $\{0, 1, \dots, N\}$, $N < \infty$. В дальнейшем будем для краткости использовать обозначение $\{\eta_n\}$. Классическая теория марковских цепей изложена, например, в фундаментальном издании [9].

Предположим, что цепь Маркова $\{\eta_n\}$ принимает значения в конечном множестве состояний $D = \{1, 2, \dots, r\}$, $r < \infty$, и заданы вероятности перехода $p_{ij} = P(\eta_{n+1} = j | \eta_n = i)$, $i, j = 1, 2, \dots, r$.

Каждое значение $i \in D$ соответствует определенному состоянию внешней среды или всей макроэкономической системы, с которой связана данная односекторная динамическая система.

Введем следующие измеримые вещественные функции:

$$\lambda_i = \lambda(i) : D \rightarrow [0, 1], \quad i \in D;$$

$$f(x, i) : X \times D \rightarrow R, \quad x \in X, \quad i \in D,$$

где $X \subseteq [0, \infty)$ — множество возможных значений удельного капитала. Функции $\lambda(i)$ и $f(x, i)$ предполагаются заданными. Данные функции описывают зависимость основных характеристик от случайного фактора η_n и удельного капитала k_n . Конкретное экономическое содержание этих функций заключается в следующем: $\lambda = \lambda(\eta_n)$ — коэффициент выбывания основных фондов односекторной динамической системы; $f(k_n, \eta_n)$ — удельный объем производства (производительность труда) односекторной динамической системы, определяемый при любых фиксированных значениях k_n и η_n в момент времени $n \in \{0, 1, \dots, N\}$.

В частности, можно предполагать, что функция $f(x, i)$, $x \in X$, $i \in D$, имеет стандартную степенную структуру, известную в теории математической экономики:

$$f(x, i) = A(i)x^{\alpha(i)},$$

где $A(i)$, $0 < A(i) < \infty$, и $\alpha(i)$, $0 < \alpha(i) < 1$, $i \in D$, — заданные функции. Тогда для произвольных значений k_n и η_n величина $y_n = A(\eta_n)k_n^{\alpha(\eta_n)}$ определяет случайное значение удельного объема производства в момент времени n .

В дальнейшем будем предполагать, что пара стохастических объектов (k_n, η_n) описывает состояние исследуемой системы в момент времени n , $n \in \{0, 1, \dots, N-1\}$.

Перейдем к описанию управления в системе. Будем предполагать, что в любой момент времени n , $n \in \{0, 1, \dots, N-1\}$, принимается некоторое решение $\rho^{(n)}(\eta_n)$, также зависящее от значения случайного фактора η_n . Обозначим $\rho_i^{(n)} = \rho^{(n)}(i)$, $i \in D$, $D = \{1, 2, \dots, r\}$. Таким образом, если в момент времени n состояние случайного фактора равно i , то параметр управления равен $\rho_i^{(n)}$. Рассмотрим $\rho^{(n)} = (\rho_1^{(n)}, \rho_2^{(n)}, \dots, \rho_r^{(n)})$ — векторный параметр управления в момент n . По своему экономическому содержанию параметр $\rho_i^{(n)}$ будет соответствовать исходной детерминированной модели, т. е. задавать распределение произведенного

продукта на инвестиционную и потребительскую части. Таким образом, в каждый момент времени n и при фиксированном состоянии внешней среды $\eta_n = i$ параметр $\rho_i^{(n)}$ определяет принимаемое решение по разделению произведенного продукта на инвестиционную и потребительскую составляющие. В соответствии с содержанием этого параметра будем предполагать, что $\rho_i^{(n)} \in U_i = [0, 1]$, $i \in D$, $n \in \{0, 1, \dots, N - 1\}$.

Обозначим через i_n удельные инвестиции, а через c_n — удельное потребление в момент n . Тогда в соответствии с принятыми предположениями

$$\begin{aligned} i_n &= \rho^{(n)}(\eta_n) f(k_n, \eta_n); \\ c_n &= (1 - \rho^{(n)}(\eta_n)) f(k_n, \eta_n); \\ c_n + i_n &= f(k_n, \eta_n). \end{aligned}$$

По аналогии с детерминированной моделью будем предполагать, что основное динамическое соотношение, описывающее поведение экономической системы, имеет вид:

$$k_{n+1} = [1 - \lambda(\eta_n)] k_n + \rho^{(n)}(\eta_n) f(k_n, \eta_n), \quad n = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (3)$$

где $[1 - \lambda(\eta_n)]k_n$ — часть удельного капитала, оставшаяся в системе после очередного выбывания в момент времени n ; $\rho^{(n)}(\eta_n) f(k_n, \eta_n)$ — дополнительные удельные инвестиции в производство, поступающие в момент времени n .

Уточним динамическую сущность соотношения (3). Согласно сделанному выше предположению, состояние рассматриваемой системы описывается парой переменных (k_n, η_n) , где k_n — удельный капитал; η_n — состояние внешней среды. Если зафиксировать $\eta_n = i$, $k_n = x$, то из (3) получаем:

$$k_{n+1} = \varphi(x, i, \rho_i^{(n)}) = [1 - \lambda(i)]x + \rho_i^{(n)} f(x, i). \quad (4)$$

Таким образом, при фиксированном состоянии в момент времени n и заданном решении $\rho_i^{(n)} = \rho^{(n)}(i)$ однозначно определяется значение k_{n+1} .

Значение фактора, характеризующего внешнюю среду η_{n+1} определяется как реализация случайной величины с заданным условным распределением

$$\begin{aligned} P(\eta_{n+1} = j | \eta_n = i) &= p_{ij}, \\ i, j &= 1, 2, \dots, r, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Отсюда следует, что соотношения (3)–(5) полностью определяют стохастическую динамику изменения состояния системы при заданных значениях параметров управления $\rho_i^{(n)}$, $n \in \{0, 1, 2, \dots, N - 1\}$. Последовательность случайных величин

(k_n, η_n) , $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1, N$, образует двумерную управляемую цепь Маркова.

В дальнейшем будем предполагать, что параметр управления $\rho_i^{(n)}$ не зависит от n , $\rho_i^{(n)} = \rho_i$, $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, $i = 1, 2, \dots, r$. Тогда решение задачи оптимального управления представляет собой вектор $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_r)$, доставляющий максимальное значение некоторому заданному стоимостному показателю эффективности.

4 Определение аддитивного стоимостного показателя эффективности и постановка задачи оптимального управления

Заддим набор конечных измеримых функций $V_i(y) : [0, \infty) \rightarrow R$, $i \in D$, $D = \{1, 2, \dots, r\}$. По аналогии с детерминированной моделью эти функции будем называть функциями полезности. Каждая функция $V_i(y)$ из этого набора соответствует состоянию i цепи Маркова $\{\eta_n\}$, т.е. состоянию случайного фактора. Если в момент времени n выполняется условие $\eta_n = i$ и удельное потребление принимает значение $y : c_n = y$, то величина $V_i(y)$ определяет некоторый условный доход, связанный с данным моментом времени. Заддим также конечную измеримую функцию $\psi(x) : [0, \infty) \rightarrow R$. Эта функция будет характеризовать вклад в суммарный доход, полученный за все время эволюции системы $\{0, 1, \dots, N\}$, который вносит достигнутый в конечный момент времени N уровень технологического развития системы k_N . Конкретно, если удельный капитал k_N принимает значение x , то величина $\psi(x)$ определяет этот дополнительный вклад в суммарный доход.

Обозначим через $\tilde{S}_n(k_n, \eta_n)$ случайный суммарный доход, полученный на интервале времени $\{n, n + 1, \dots, N\}$, $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Этот доход зависит от состояния системы в момент n , т.е. от пары (k_n, η_n) . Теперь зафиксируем состояние системы $(k_n = x, \eta_n = i)$. Тогда через $S_n(x, i)$ будем обозначать соответствующее условное математическое ожидание случайного дохода:

$$\begin{aligned} S_n(x, i) &= E \left[\tilde{S}_n(k_n, \eta_n) | k_n = x, \eta_n = i \right], \\ n &= 0, 1, 2, \dots, N - 1. \end{aligned}$$

Согласно сделанному выше предположению, величина $V_i(y)$ представляет собой условное математическое ожидание дохода, полученного в произвольный момент времени $n \in \{0, 1, \dots, N - 1\}$ при

условиях $c_n = y, \eta_n = i$. Поскольку при фиксированном управлении ρ_i величина удельного потребления выражается формулой $c_n = (1 - \rho_i)f(k_n, i)$, то можно представить условное математическое ожидание дохода, полученного в произвольный момент времени n при условиях $k_n = x, \eta_n = i$ и принятом решении ρ_i , в виде $V_i((1 - \rho_i)f(x, i))$. Отсюда следует рекуррентная формула для условных математических ожиданий дохода:

$$E \left[\tilde{S}_n(k_n, \eta_n) | k_n = x, \eta_n = i \right] = V_i((1 - \rho_i)f(x, i)) + E \left[\tilde{S}_{n+1}(k_{n+1}, \eta_{n+1}) | k_n = x, \eta_n = i \right],$$

$$n = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (6)$$

Воспользовавшись свойствами условных математических ожиданий и соотношениями (3)–(5), получим:

$$E \left[\tilde{S}_{n+1}(k_{n+1}, \eta_{n+1}) | k_n = x, \eta_n = i \right] = \sum_{j=1}^r E \left[\tilde{S}_{n+1}(k_{n+1}, \eta_{n+1}) | k_n = x, \eta_n = i, \eta_{n+1} = j \right] P(\eta_{n+1} = j | \eta_n = i) = \sum_{j=1}^r E \left[\tilde{S}_{n+1}(k_{n+1}, \eta_{n+1}) | k_n = x, k_{n+1} = \varphi(x, i, \rho_i) = (1 - \lambda_i)x + \rho_i f(x, i), \eta_n = i, \eta_{n+1} = j \right] p_{ij} = \sum_{j=1}^r S_{n+1}(\varphi(x, i, \rho_i), j) p_{ij}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) следует рекуррентное соотношение для условных математических ожиданий доходов:

$$S_n(x, i) = V_i((1 - \rho_i)f(x, i)) + \sum_{j=1}^r p_{ij} S_{n+1}(\varphi(x, i, \rho_i), j),$$

$$n = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (8)$$

В конечный момент времени $n = N$ решение об управлении не принимается. Вклад в суммарный доход определяется функцией $\psi(k_n)$. Таким образом,

$$S_N(x, i) = S_N(x) = \psi(x), \quad x \in X. \quad (9)$$

Аддитивный стоимостный функционал $S_n(x, i)$, $x \in X, i \in D = \{1, 2, \dots, r\}, n = 0, 1, 2, \dots, N$, полностью определяется рекуррентными соотношениями (8) и (9). Поскольку основная задача оптимального управления связана со всем

периодом эволюции системы $\{0, 1, \dots, N\}$, естественно выбрать для нее в качестве показателя эффективности управления суммарный средний доход $S_0(x_0, i_0)$, зависящий от начальных условий $k_0 = x_0$ и $\eta_0 = i_0$. Оптимальная стратегия управления $\rho^* = (\rho_1^*, \rho_2^*, \dots, \rho_r^*)$ также будет зависеть от указанных начальных условий. Такая особенность представляется естественной, поскольку в марковской стохастической модели любые вероятностные характеристики на конечном интервале времени зависят от начального состояния процесса.

5 Уравнения Беллмана и теоретическое решение задачи оптимального управления

Применим для решения сформулированной задачи метод динамического программирования. Согласно общей схеме этого метода [10, 11], рассмотрим семейство задач оптимизации, связанных с интервалами времени $\{n, n + 1, \dots, N - 1, N\}$, $n = 0, 1, \dots, N - 1$. Рассмотрим произвольные фиксированные значения состояний системы $k_n = x_n \in X, \eta_n = i_n \in D, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1, N$, и управлений $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_r)$. Роль целевого показателя в задаче с номером n будет играть определенный в предыдущем разделе аддитивный стоимостный функционал $S_n(x, i) = S_n(x, i, \rho)$, в качестве ограничений рассматриваются соотношения, которым удовлетворяют основные параметры модели:

$$\left. \begin{aligned} S_n(x_n, i_n; \rho) &\rightarrow \max; \\ x_{m+1} &= \varphi(x_m, i_m; \rho) = \\ &= (1 - \lambda_m)x_m + \rho_m f(x_m, i_m), \\ & i_m \in D, \quad m = n, n + 1, \dots, N - 1; \\ (x_n, i_n) &\text{— фиксированное состояние} \\ &\text{в очередной «начальный» момент времени } n; \\ \rho_i &\in U = [0, 1], \quad i \in D = \{1, 2, \dots, r\}. \end{aligned} \right\} (10)$$

Параметр n пробегает значения $\{0, 1, \dots, N - 1\}$. Заметим, что при $n = 0$ задача (10) совпадает с основной задачей оптимального управления в рассматриваемой модели. Как известно [10, 11], функция Беллмана совпадает со значениями целевой функции на оптимальной стратегии управления. Обозначим эту функцию, соответствующую задаче (10), через $B_n(x, i)$, $x \in X, i \in D, n \in \{0, 1, \dots, N - 1\}$. Сформулируем основное утверждение, связанное с поставленной задачей управления.

Теорема 1. В рассматриваемой модели управления функции Беллмана $B_n(x, i)$, $n \in \{0, 1, \dots, N - 1, N\}$, удовлетворяют следующей системе функциональных уравнений, называемых уравнениями Беллмана:

$$B_n(x, i) = \max_{\rho_i \in U} \left[V_i((1 - \rho_i)f(x, i)) + \sum_{j=1}^r p_{ij} B_{n+1}(\varphi(x, i, \rho_i), j) \right],$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N - 1; \quad (11)$$

$$B_N(x, i) = B_N(x) = \psi(x),$$

$$i \in D = \{1, 2, \dots, r\}. \quad (12)$$

Если вектор управлений $\rho^* = \{\rho_1^*, \rho_2^*, \dots, \rho_r^*\}$ удовлетворяет всем ограничениям в основной задаче и уравнениям Беллмана (11), (12), то он является оптимальным в этой задаче.

Замечания к теореме 1

1. Поставленная задача оптимального стохастического управления по форме аналогична задачам управления в марковских моделях, рассмотренных в работах [12, 13]. Отличие данной задачи заключается в том, что в ней основной случайный процесс представляет собой двумерную цепь Маркова $\{k_n, \eta_n\}$, изменения состояний которой описываются соотношениями (3)–(5). Кроме того, этот основной процесс реализуется на конечном интервале времени. Однако общий принцип Беллмана для управляемого процесса, сформулированный в классических работах [10, 11], остается справедливым. Применим этот принцип к задаче управления, в которой показатель эффективности определяется системой рекуррентных соотношений (8), (9). Если зафиксировать произвольное состояние ($k_n = x$, $\eta_n = i$) и решение ρ_i , то, согласно принципу Беллмана, дальнейшее поведение системы должно быть оптимальным по отношению к состоянию, полученному в результате этого решения. Новое состояние системы определяется в соответствии с динамическими соотношениями (3)–(5). После перехода в это состояние дальнейшее поведение должно быть оптимально, и целевая функция задачи управления на интервале времени $\{n+1, n+2, \dots, N\}$ при новом начальном состоянии должна совпадать с функцией Беллмана. Теперь для оптимальности процесса на всем интервале времени $\{n, n+1, \dots, N\}$ достаточно выбрать

оптимальное решение ρ_i , доставляющее максимум выражению в правой части соотношения (11). Таким образом, соотношение (11) непосредственно следует из принципа Беллмана.

2. Предположим, что некоторый набор управлений $\rho^* = \{\rho_1^*, \rho_2^*, \dots, \rho_r^*\}$ удовлетворяет всем ограничениям основной задачи (10) при значении параметра $n = 0$ и уравнениям Беллмана. Тогда в соотношениях (11), (12) достигаются равенства. При этом функции Беллмана будут определяться теми же самыми рекуррентными соотношениями, что и целевые показатели (8), (9). В частности, целевая функция в основной задаче при $n = 0$ будет совпадать с функцией Беллмана

$$S_0(x_0, i_0, \rho^*) = B_0(x_0, i_0) \quad (13)$$

при фиксированных начальных условиях ($k_0 = x_0$, $\eta_0 = i_0$). С учетом определения функции Беллмана из равенства (13) следует оптимальность вектора управлений $\rho^* = \{\rho_1^*, \rho_2^*, \dots, \rho_r^*\}$.

6 Заключение

Вывод системы уравнений Беллмана завершает теоретическую часть исследования поставленной задачи оптимального управления. Дальнейшее исследование должно быть связано с численным решением системы уравнений Беллмана и определением вектора оптимальных управлений. Для детерминированной динамической односекторной экономической модели в работе [8] был построен численный алгоритм решения системы уравнений Беллмана. Создание такого алгоритма для новой стохастической динамической односекторной экономической модели представляет собой самостоятельную задачу и должно быть реализовано в отдельной публикации.

Литература

1. Ашманов С.А. Математические модели и методы в экономике. — М.: Изд-во Московского ун-та, 1980. 199 с.
2. Интрилигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория / Пер. с англ. — М.: Айрис-Пресс, 2002. 553 с. (Intriligator M. Mathematical methods of optimization and economic theory. — Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2002. 508 p.)
3. Иоффе А.Д., Тихомиров В.М. Теория экстремальных задач. — М.: Наука, 1974. 480 с.
4. Ливишиц К.И., Параев Ю.И. Оптимальное управление. — СПб.: Лань, 2020. 232 с.

5. *Kamien M., Schwartz N.* Dynamic optimization. — New York, NY, USA: Elsevier North Holland, 1981. 331 p.
6. *Barro R., Sala-i-Martin X.* Economic growth. — 2nd ed. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2004. 654 p.
7. *Параев Ю. И.* Оптимальное управление в динамической экономике. — Томск: НТЛ, 2015. 104 с.
8. *Шнурков П. В., Рудак А. О.* Алгоритмическое решение проблемы оптимального управления в динамической односекторной экономической модели на основе метода динамического программирования // Системы и средства информатики, 2019. Т. 29. № 1. С. 128–139.
9. *Ширяев А. Н.* Вероятность-2. — 4-е изд. — М.: МЦНМО, 2007. 416 с.
10. *Беллман Р.* Динамическое программирование / Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1960. 400 с. (*Bellman R.* Dynamic programming. — Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1957. 339 p.)
11. *Беллман Р., Дрейфус С.* Прикладные задачи динамического программирования / Пер. с англ. — М.: Наука, 1965. 459 с. (*Bellman R., Dreyfus S.* Applied dynamic programming. — London: Oxford University Press, 1962. 363 p.)
12. *Ховард Р. А.* Динамическое программирование и марковские процессы / Пер. с англ. — М.: Советское радио, 1964. 194 с. (*Howard R. A.* Dynamic programming and Markov processes. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1960. 136 p.)
13. *Майн Х., Осаки С.* Марковские процессы принятия решений / Пер. с англ. — М.: Наука, 1977. 176 с. (*Mine H., Osaki S.* Markovian decision processes. — New York, NY, USA: Elsevier, 1970. 142 p.)

Поступила в редакцию 18.10.21

CREATION OF A STOCHASTIC DYNAMIC ONE-SECTOR ECONOMIC MODEL WITH DISCRETE TIME AND ANALYSIS OF THE CORRESPONDING OPTIMAL CONTROL PROBLEM

P. V. Shnurkov

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

Abstract: The work is devoted to the creation of a stochastic dynamic model of optimal control with discrete time within the framework of a one-sector economic system. The basis is a classical deterministic dynamic model of the economic system in which one universal product is produced. This product is divided into investment and consumer components. System management consists in determining the relationship between these components. In this work, it is assumed that the main parameters of the system depend on some random factor that characterizes the influence of the external environment. This factor is described by a homogeneous Markov chain with a finite set of states and a given transition probability matrix. In this work, a stochastic model of the evolution of the system under consideration is constructed which is a two-dimensional Markov process with discrete time. In terms of its economic content, the first component of this process is specific capital and the second is the state of an external random factor. The control parameter or decision at each moment of time represents the share of the specific product produced directed to investment. The recurrent setting of the cost additive indicator of management efficiency is described. The theoretical basis for solving the problem of optimal control is the method of dynamic programming. In this work, a system of Bellman functional equations is obtained, the solution of which is the optimal control strategy.

Keywords: optimal control problem with discrete time; stochastic dynamic one-sector economic model; controlled two-dimensional Markov chain; dynamic programming method for a discrete-time control problem; Bellman equations

DOI: 10.14357/19922264210405

References

1. Ashmanov, S. A. 1980. *Matematicheskie modeli i metody v ekonomike* [Mathematical models and methods in economics]. Moscow: Moscow University Press. 199 p.
2. Intriligator, M. 2002. *Mathematical methods of optimization and economic theory*. Philadelphia, PA: SIAM. 508 p.
3. Ioffe, A. D., and V. M. Tikhomirov. 1974. *Teoriya ekstremal'nykh zadach* [Extremal problems theory]. Moscow: Nauka. 480 p.
4. Livshits, K. I., and Yu. I. Paraev. 2020. *Optimal'noe upravlenie* [Optimal control]. St. Petersburg: Lan'. 232 p.
5. Kamien, M., and N. Schwartz. 1981. *Dynamic optimization*. New York, NY: Elsevier North Holland. 331 p.

6. Barro, R., and X. Sala-i-Martin. 2004. *Economic growth*. 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press. 654 p.
7. Paraev, Yu. I. 2015. *Optimal'noe upravlenie v dinamicheskoy ekonomike* [Optimal control in a dynamic economy]. Tomsk: NTL. 104 p.
8. Shnurkov, P. V., and A. O. Rudak. 2019. Algoritmicheskoe reshenie problemy optimal'nogo upravleniya v dinamicheskoy odnosektornoy ekonomicheskoy modeli na osnove metoda dinamicheskogo programmirovaniya [Algorithmic solution of the problem of optimal control in a dynamic one-sector economic model based on the method of dynamic programming]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 29(1):128–139.
9. Shiryaev, A. N. 2019. *Probability-2*. Graduate texts in mathematics ser. 3rd ed. New York, NY: Springer. Vol. 95. 358 p.
10. Bellman, R. 1972. *Dynamic programming*. 6th ed. Princeton, NJ: Princeton University Press. 402 p.
11. Bellman, R., and S. Dreyfus. 1962. *Applied dynamic programming*. London: Oxford University Press. 363 p.
12. Howard, R. A. 1960. *Dynamic programming and Markov processes*. Cambridge, MA: MIT Press. 136 p.
13. Mine, H., and S. Osaki. 1970. *Markovian decision processes*. New York, NY: Elsevier. 142 p.

Received October 18, 2021

Contributor

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

ОТРАЖЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЛЕКСИКОГРАФИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ*

А. А. Гончаров¹, И. М. Зацман², М. Г. Кружков³, Е. Ю. Лошилова⁴

Аннотация: Рассматриваются две проблемы, решение которых необходимо для отражения эволюции лексикографических знаний. Описываемые в статье знания представлены в виде классификаций, чьи рубрики используются для снабжения лингвистической разметкой текстовых данных в информационных системах. Эволюция лексикографических знаний обсуждается на примере надкорпусной базы данных (НБД). Первая проблема касается того, как интегрировать в структуру НБД средства отражения изменений смыслового содержания рубрик. Предлагаемое решение заключается в добавлении в структуру НБД двух таблиц, обеспечивающих хранение данных о состояниях рубрик и об операциях по изменению этих рубрик. Показано, как эти таблицы встроены в структуру НБД. Вторая проблема связана с тем, как обеспечить внесение в НБД изменений с помощью пользовательского интерфейса. Представлен интерфейс НБД, позволяющий вносить сведения об этих изменениях. Предлагаемые решения могут быть масштабированы и использоваться для отражения эволюции не только лексикографического, но и, шире, научного знания, если это знание представлено в форме динамической классификационной системы.

Ключевые слова: эволюция лексикографических знаний; динамическая классификационная система; версионные онтологии; лингвистическое аннотирование; реклассификация аннотаций

DOI: 10.14357/19922264210406

1 Введение

Статья продолжает серию работ по эволюции лексикографических знаний, представленных в виде классификаций, чьи рубрики используются для снабжения лингвистической разметкой (= для лингвистического аннотирования) текстовых данных в информационных системах. Эволюция лексикографических знаний обсуждается на примере НБД.

В работе [1] — первой из этой серии — была описана структура словарной статьи и те изменения, которые лексикографы могут вносить в статью в ходе подготовки словаря. Был предложен подход к проектированию информационной системы, позволяющей сохранять информацию об этих изменениях. Затем в работе [2] подход был детализирован: сопоставлены статические и динамические классификационные системы (далее — СКС и ДКС соответственно), рассмотрена проблема реклассификации, возникающая при использовании ДКС. Были определены 7 операций по изменению классификационных рубрик (на примере рубрик, которые используются в НБД, чтобы распределять на классы употребления немецких модальных гла-

голов (НМГ) на основании их семантики). В работе [3] были сопоставлены подходы к классификации сущностей с использованием изменяемых во времени классификационных систем, в частности ДКС, и онтологий других видов [4], а также дано описание того, как обеспечивается поддержка ДКС, интегрированной в НБД НМГ.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы описать: (1) как система отражения изменений классификационных рубрик встроена в структуру НБД и (2) как обеспечена возможность внесения этих изменений в ДКС через пользовательский интерфейс.

2 Лингвистическое аннотирование и эволюция классификаций

Сегодня лексикографическая деятельность все теснее сближается с корпусной лингвистикой: словари составляются с опорой на анализ корпусного материала⁵. Это интегрированное направление получило название «корпусная лексикография» [5].

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-012-00166) с использованием ЦКП «Информатика» ФИЦ ИУ РАН.

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

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

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, magnit75@yandex.ru

⁴Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, lena0911@mail.ru

⁵К примеру, словари, созданные на основе Национального корпуса русского языка (НКРЯ), перечислены по адресу <http://dict.ruslang.ru>.

Пример аннотации ПС, сформированной в НБД НМГ

Контекст НМГ в оригинале	Коды рубрик оригинала	Перевод контекста на русский язык	Коды рубрик перевода
Dort möchte ich mit dir <i>sein</i> . [С. Funke. Tintenblut (2005)]	mögen <1sg> <PraetConj> <+Inf> <mögen-01>	Вот где я бы хотела с тобой <i>оказаться</i> . [К. Функе. Чернильная смерть (пер. М. Сокольская, 2007)]	хотеть <1sg> <Past+бы> <+Inf>

Примечания.

Расшифровка кодов рубрик оригинала

Основная рубрика:

- **mögen** — в данном контексте исследуемым НМГ выступает «mögen» (слово «möchte», выделенное полужирным шрифтом в столбце 1, является формой этого НМГ).

Дополнительные рубрики:

- <1sg> — исследуемый НМГ употреблен в форме первого лица единственного числа;
- <PraetConj> — исследуемый НМГ употреблен в форме прошедшего времени сослагательного наклонения (от лат. *praeteritum conjunctivi*);
- <+Inf> — исследуемому НМГ подчинен инфинитив (слово «sein», выделенное курсивом в столбце 1);
- <mögen-01> — исследуемый НМГ употреблен в первом значении согласно порядку описания значений в словарной статье из [6].

Расшифровка кодов рубрик перевода

Основная рубрика:

- **хотеть** — в данном контексте семантику исследуемого НМГ в переводе передает глагол «хотеть» (слова «бы хотела», выделенные полужирным шрифтом в столбце 3, являются неоднословной формой данного глагола).

Дополнительные рубрики:

- <1sg> — глагол употреблен в форме первого лица единственного числа;
- <Past+бы> — глагол употреблен в форме сослагательного наклонения (сочетание формы прошедшего времени и частицы «бы»);
- <+Inf> — глаголу подчинен инфинитив (слово «оказаться», выделенное курсивом в столбце 3).

Коды рубрик ПС — в данном примере отсутствуют.

Для фиксации результатов анализа могут использоваться базы данных. Так, в целях интеграции корпусного материала и словарных статей немецко-русского словаря [6] для 6 НМГ — *dürfen, können, mögen, müssen, sollen* и *wollen* — была создана НБД НМГ¹. В нее были загружены тексты параллельного немецкого подкорпуса НКРЯ (<https://ruscorp.org/new/search-para-de.html>) для направления перевода «немецкий–русский» общим объемом более 15,6 млн словоупотреблений (на 15.09.2021).

Чтобы с использованием НБД интегрировать исходные версии словарных статей, в которых описываются НМГ, с примерами из корпуса и получить эмпирический материал, необходимый для уточнения их лексикографического описания, следует:

- (1) осуществить поиск пар фрагментов параллельных текстов, где фрагмент на немецком языке содержит словоупотребление искомого НМГ;
- (2) провести семантический анализ этого словоупотребления, выделив контекст оригинала, достаточный для определения значения сло-

воупотребления согласно [6], и соответствующий оригиналу контекст перевода;

- (3) снабдить эти контексты лингвистической разметкой (= осуществить их лингвистическое аннотирование; о его видах см. [10, с. 6–7; 11, с. 484–776; 12–15];
- (4) повторять пп. 2 и 3 до получения необходимого объема материала.

Контекстам оригинала и перевода, а также переводному соответствию (ПС) в ходе лингвистического аннотирования при помощи НБД приписывается информация: о НМГ, который употреблен в оригинале; грамматической форме этого НМГ; характеристиках контекста оригинала; семантике употребления НМГ; языковой единице, передающей семантику НМГ в переводе; грамматической форме этой единицы; характеристиках контекста перевода; характеристиках ПС. Эта информация фиксируется при помощи рубрик фасетной классификации [16, 17]. Результат аннотирования одной пары контекстов (оригинала и перевода) называется аннотацией ПС. Аннотация ПС может быть представлена в виде таблицы (см. пример в таблице).

¹Описание лингвистических целей создания НБД НМГ дано в [7]; некоторые полученные с ее помощью результаты описаны в [8, 9].

В процессе анализа корпусного материала знание лексикографов о семантике языковых единиц нередко меняется¹. Если же семантика этих единиц описывается при помощи классификационных рубрик, как в НБД НМГ, где каждому контексту с НМГ должна быть присвоена одна рубрика фасета «Значения НМГ»², то эти рубрики также могут меняться вслед за изменением знания. Так, при анализе материала параллельного немецко-русского корпуса встречаются контексты, содержащие такие употребления НМГ, которые не удастся описать с помощью текущей версии классификации из-за отсутствия в ней релевантных рубрик³. В таких случаях составители словаря пересматривают представления о сегментации спектра значений НМГ, что приводит к изменениям словарной статьи, для описания которых нужна *динамическая* классификационная система с изменяемыми рубриками. По этой причине в НБД НМГ было решено использовать для аннотирования именно ДКС. В отличие от версионных классификационных систем с заданным периодом времени их обновления⁴ добавление и изменение рубрик ДКС возможно в любой момент времени. Это позволяет оперативно отражать в НБД этапы эволюции лексикографических знаний и использовать добавленные и измененные рубрики в процессе лингвистического аннотирования сразу после внесения изменений.

3 Эволюция фасетной динамической классификационной системы

Как было сказано выше, совокупность рубрик, используемых для аннотирования контекстов, содержащих употребления НМГ, представляет собой фасетную ДКС. Для удобства представления данных об аннотируемом контексте оригинала один фасет — «Немецкий модальный глагол» — считается основным, а все остальные — дополнительными. Так, в таблице (столбец 2) рубрика, входя-

щая в основной фасет (далее — основная рубрика) и использованная для аннотирования контекста оригинала, выделена полужирным шрифтом, а рубрики, входящие в другие фасеты (далее — дополнительные рубрики), перечислены под ней. Система отражения изменений в рубриках ДКС на данный момент реализована для фасета «Значения НМГ».

В структуре НБД можно выделить две составляющие: корпусную (обеспечивающую хранение аннотируемых текстов) и надкорпусную (обеспечивающую хранение аннотаций, в частности аннотаций ПС с НМГ). С описанием логических схем обеих составляющих НБД можно подробнее ознакомиться в [20]. На рис. 1 представлен фрагмент логической схемы надкорпусной составляющей НБД НМГ, включающий 4 таблицы, используемые во всех НБД, разработанных на сегодняшний день («Доп. рубрика», «Фасет доп. рубрик», «Фрагмент», «Основная рубрика»), а также две таблицы, добавленные в НБД НМГ, чтобы обеспечить сохранение ретроспективы поэтапных изменений, вносимых в дефиниции рубрик НБД (это таблицы «Состояние» и «Операция»). История изменений рубрик фасета «Значения НМГ» полностью сохраняется в таблицах «Состояние» и «Операция», при этом в таблице «Состояние» хранятся все состояния дефиниций рубрик этого фасета (как актуальные, так и устаревшие), а в таблице «Операция» — описания всех операций, с помощью которых в эти рубрики вносились изменения. Поля этих таблиц и реализация связи между ними подробно описаны в работе [3].

Рисунок 1 также иллюстрирует связь этих двух таблиц с другими таблицами надкорпусной составляющей НБД. Следует отметить, что в результате выполнения операций DELETE или MERGE (подробнее об этих и других операциях см. [2, 3]) записи вместе с соответствующими уникальными идентификаторами могут полностью удаляться из таблицы «Доп. рубрика», однако данные об истории изменений этих удаленных записей будут по-прежнему доступны в таблице «Состояние». В связи с этим

¹Так, в статье «Лексикография», приведенной в «Глоссарии по корпусной лингвистике», отмечается: «Основанные на корпусах подходы могут помочь создателям словарей выявить намного больше значений и способов употребления лексических единиц. К примеру, второе издание словаря “Longman Dictionary of Contemporary English” было написано без использования корпусных данных, тогда как при написании третьего издания корпусные данные использовались. Если во втором издании для слова “know” описывались 20 значений, то в третьем — более 40» (см. [18, с. 107–108]; перевод авторов статьи).

²Возможность присвоить более одной рубрики, описывающей семантику употребления НМГ, существует, но на практике применяется крайне редко.

³Например, была найдена следующая пара контекстов: «„Großvater“, konnte der kleine Hans Castorp im Kabinett wohl sagen [. . .], „zeig mir doch, bitte, die Taufschale!“» [Th. Mann. Der Zauberberg (1924)]; «Дедушка, — обычно говорил маленький Ганс Касторп, войдя в кабинет [. . .], — покажи мне, пожалуйста, купель!» [Т. Манн. Волшебная гора (пер. В. Станевич, 1959)]. Для описания значения глагола «können» в этом контексте (выделенная полужирным форма «konnte») 23.04.2020 в классификацию была добавлена рубрика с кодом «können-09» (Id 953). Она используется, когда «können» употреблен в форме прошедшего времени изъявительного наклонения (*praeteritum indicativi*) в повествовании о прошлом и может быть переведен как «бывало» или «случалось».

⁴Так, рубрики Международной патентной классификации могут меняться не чаще, чем раз в квартал [19].

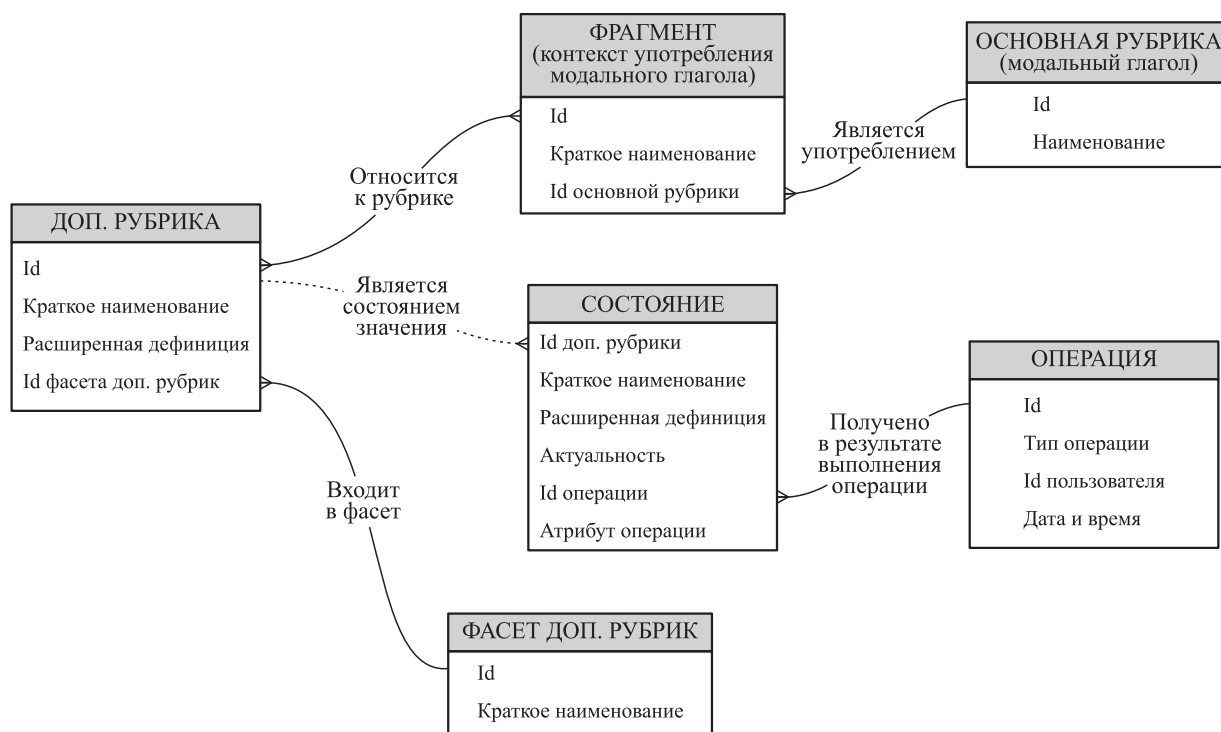


Рис. 1 Фрагмент логической схемы НБД, включающий таблицы, отвечающие за сохранение ретроспективы поэтапных изменений классификационных рубрик

связь между таблицами «Доп. рубрика» и «Состояние» (показанная пунктиром) реализуется лишь на логическом, но не на физическом уровне НБД, поскольку в противном случае удаление записей из таблицы «Доп. рубрика» приводило бы к ошибке, связанной с нарушением ссылочной целостности данных: записи в таблице «Состояние» через внешний ключ ссылались бы на удаленные записи из таблицы «Доп. рубрика». При использовании представленной выше схемы в таблице «Состояние» может сохраняться история изменений не только всех рубрик фасета «Значения НМГ», присутствующих в таблице «Доп. рубрика», но и тех рубрик, которые уже были удалены из этой таблицы.

4 Внесение изменений в динамическую классификационную систему

Чтобы обеспечить возможность внесения изменений в рубрики ДКС лингвистами, был разработан пользовательский интерфейс.

На рис. 2 представлен пример заполнения формы редактирования рубрик фасета «Значения НМГ». Для внесения изменений необходимо преж-

де всего выбрать из выпадающего списка одну из 7 операций, что определит внешний вид формы редактирования. Поскольку в примере с рис. 2 выбрана операция «REVISE» — изменение дефиниции рубрики, при котором смысловое содержание этой дефиниции не сужается и не затрагиваются дефиниции других рубрик — можно выбрать из выпадающего списка только одну рубрику (в данном случае «mögen-01»). После выбора рубрики в поле «Описание значения» отобразится ее текущая дефиниция и станет доступным текстовое поле «Новое описание значения», куда вводится новая дефиниция. Изменения вносятся по клику на соответствующую кнопку¹, после чего во всех аннотациях с рубрикой «mögen-01» (как, например, аннотация из таблицы) эта рубрика будет ссылаться на новую версию дефиниции.

На рис. 3 представлен пример заполнения формы редактирования рубрик фасета «Значения НМГ» для выполнения операции «MERGE» — слияния дефиниций двух рубрик. Пользователь выбирает две рубрики, дефиниции которых объединяются в одну, и вводит в текстовое поле дефиницию результирующей рубрики. После внесения изменений рубрика с кодом «mögen-06» получит дефиницию, введенную в поле «Описание значения после слияния», рубрика «mögen-07» будет удалена, а во

¹Для отмены изменений, внесенных ошибочно, предусмотрена кнопка «Отменить».

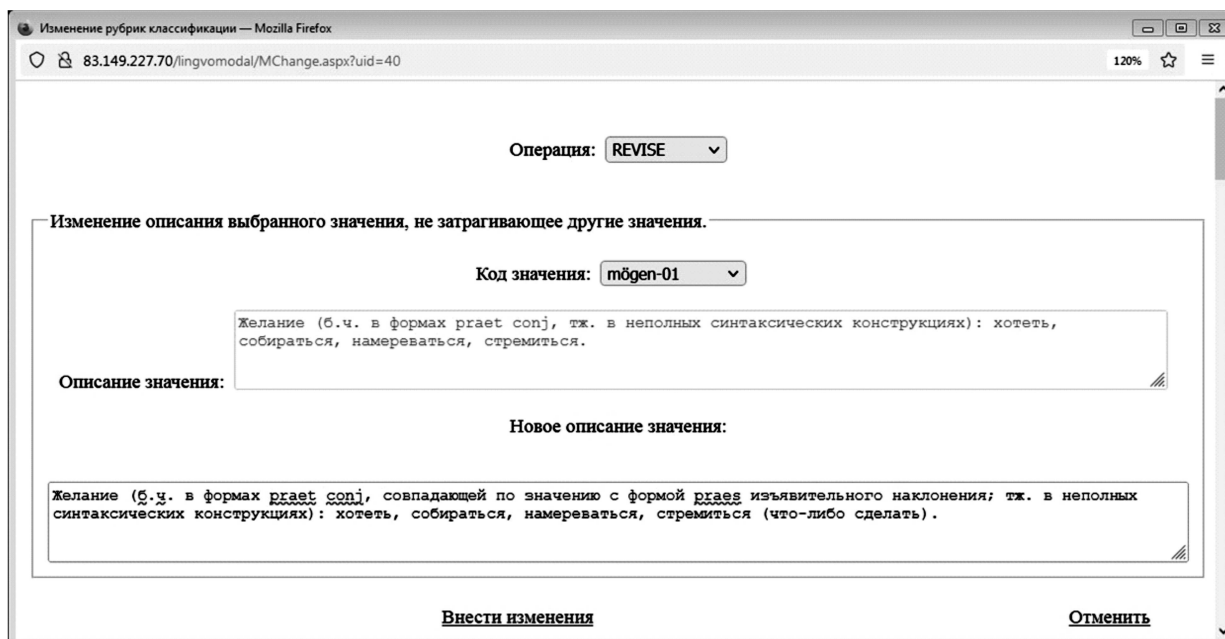


Рис. 2 Форма редактирования рубрик фасета «Значения НМГ»: независимое изменение дефиниции (операция 10159, выполнена 27.06.2021)

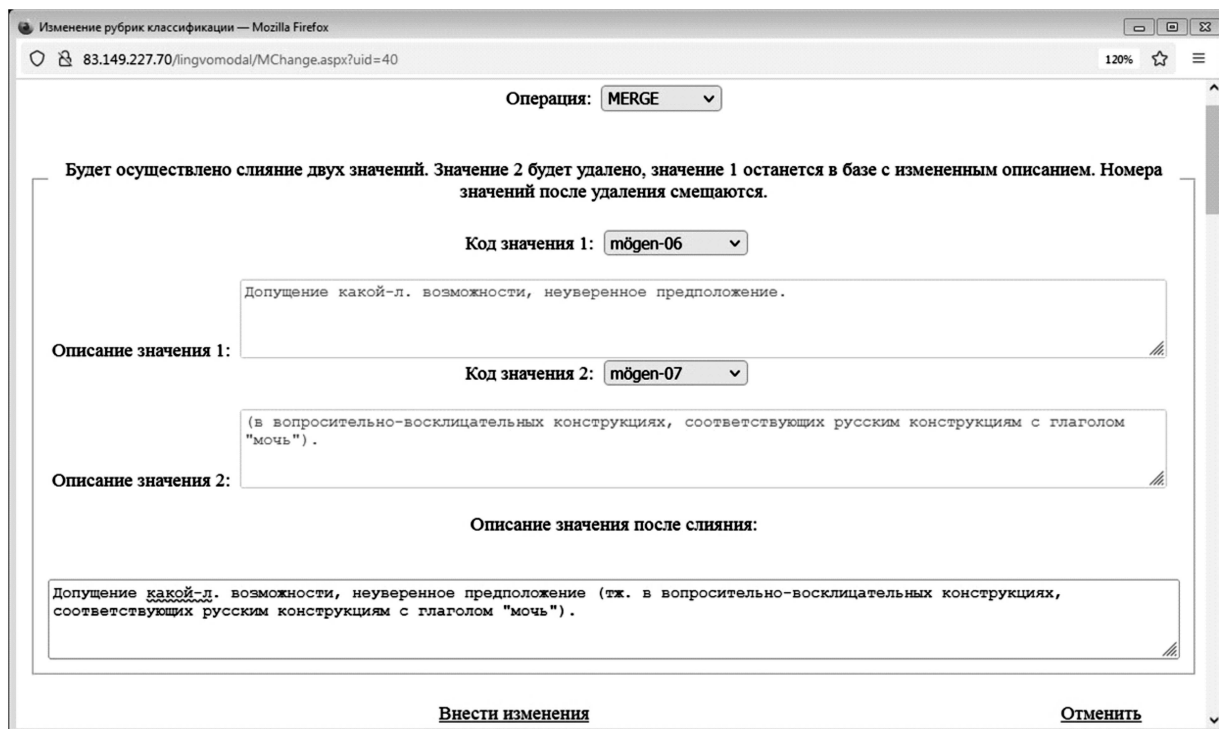


Рис. 3 Форма редактирования рубрик фасета «Значения НМГ»: слияние двух дефиниций (операция 10161, выполнена 27.06.2021)

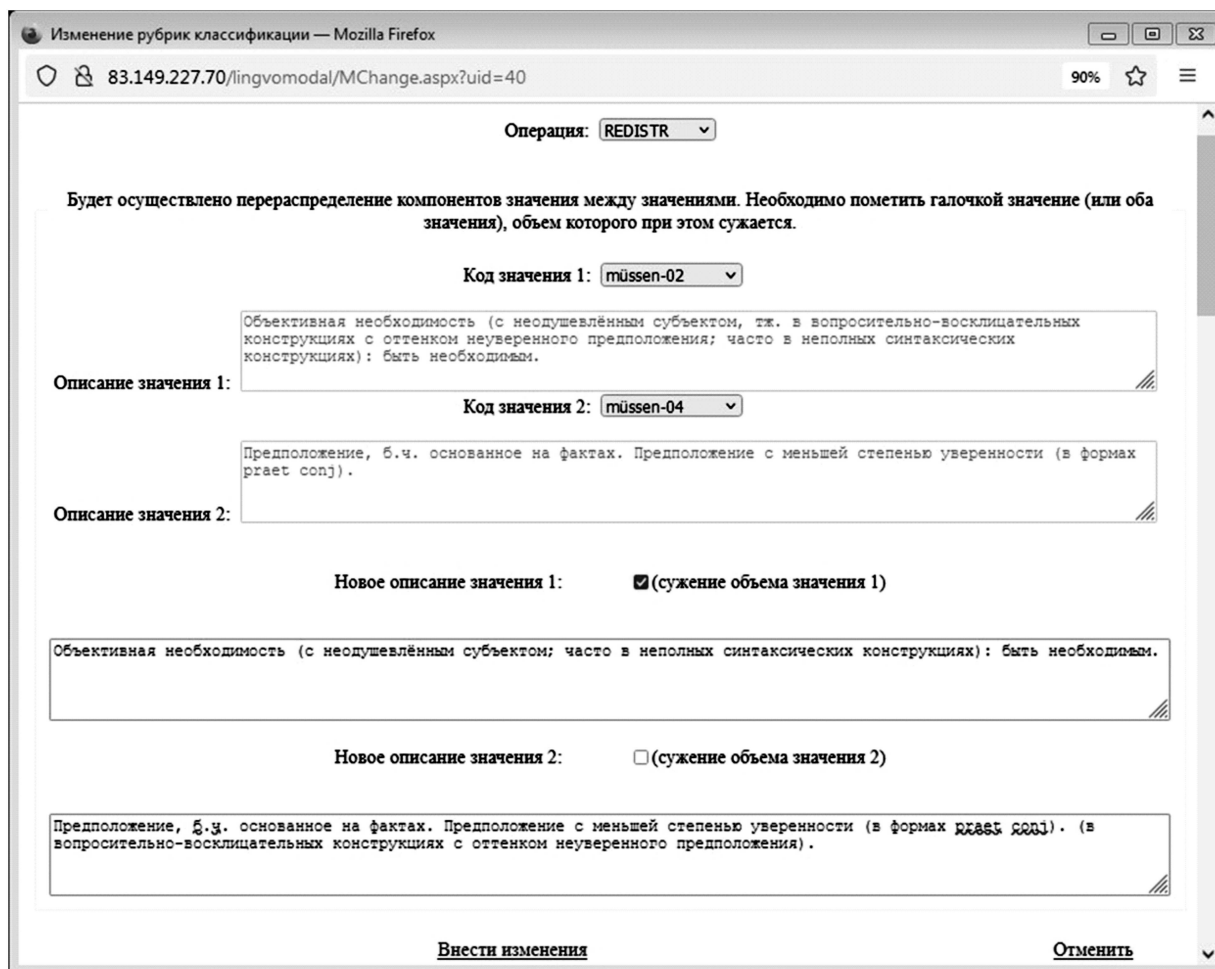


Рис. 4 Форма редактирования рубрик фасета «Значения НМГ»: перераспределение смыслового содержания двух дефиниций (операция 10162, выполнена 28.06.2021)

всех аннотациях, где она была использована ранее, вместо кода «mögen-07» будет автоматически проставлен код «mögen-06».

На рис. 4 представлен еще один пример заполнения формы редактирования рубрик фасета «Значения НМГ»: для выполнения операции «REDISTR». Эта операция описывает такое изменение дефиниций двух рубрик, при котором компоненты смыслового содержания дефиниций этих рубрик перераспределяются между ними.

В примере с рис. 4 изменяются дефиниции двух рубрик: «müssen-02» и «müssen-04». Как видно, после выполнения этого изменения из дефиниции рубрики «müssen-02» фрагмент «в вопросительно-восклицательных конструкциях с оттенком неуверенного предположения» переносится в дефиницию рубрики «müssen-04». Следовательно, объем значения дефиниции рубрики «müssen-02» сужается, поэтому в форме необходимо поставить соответствующий флажок. Все аннотации, содержавшие

эту рубрику, после выполнения операции подлежат *экспертной реклассификации*, нацеленной на выявление тех из них, которые должны быть отнесены к рубрике «müssen-04». Чтобы обеспечить возможность поиска этих аннотаций, все они программно помечаются соответствующим тегом.

5 Заключение

Описанный в работах [2, 3] и в настоящей статье подход к разработке баз данных, обеспечивающих поддержку фасетных ДКС, на сегодняшний день реализован для одного фасета классификации, однако опыт, полученный в ходе выполнения этой работы, показывает, что такой подход может быть адаптирован ко всей классификации. Система отражения изменений классификационных рубрик, основанная на использовании баз данных, обеспечивает широкий спектр возможностей анализа вносимых изменений.

Постоянная эволюция современного научного знания, представляемого в информационных системах, в том числе при помощи классификаций [21–26], свидетельствует о растущей актуальности исследования фасетных ДКС и необходимости продолжать изучение проблем представления изменяемого знания в информационных системах.

Литература

1. Гончаров А. А., Зацман И. М., Кружков М. Г. Темпоральные данные в лексикографических базах знаний // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 4. С. 90–96.
2. Гончаров А. А., Зацман И. М., Кружков М. Г. Эволюция классификаций в надкорпусных базах данных // Информатика и её применения, 2020. Т. 14. Вып. 4. С. 108–116.
3. Гончаров А. А., Зацман И. М., Кружков М. Г. Представление новых лексикографических знаний в динамических классификационных системах // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 1. С. 86–93.
4. McGuinness D. L. Ontologies come of age // Spinning the Semantic Web: Bringing the World Wide Web to its full potential / Eds. D. Fensel, J. Hendler, H. Lieberman, W. Wahlster. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2003. P. 171–194.
5. Ooi V. B. Y. Computer corpus lexicography. — Edinburgh, U.K.: Edinburgh University Press, 1998. 255 p.
6. Немецко-русский словарь актуальной лексики / Под ред. Д. О. Добровольского. — М.: Лексрус, 2021 (в печати).
7. Добровольский Д. О., Зализняк Анна А. Немецкие конструкции с модальными глаголами и их русские соответствия: проект надкорпусной базы данных // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По мат-лам Междунар. конф. «Диалог». — М.: РГГУ, 2018. Вып. 17(24). С. 172–184.
8. Добровольский Д. О. Немецкие модальные глаголы в параллельном корпусе и задачи двуязычной лексикографии // Германские языки: текст, корпус, перевод. — М.: Институт языкознания РАН, 2020. С. 103–116.
9. Добровольский Д. О., Зализняк Анна А. Русские конструкции с потенциально модальным значением по данным параллельных корпусов // Труды Института русского языка им. В. В. Виноградова, 2020. № 3. С. 35–49.
10. Захаров В. П. Корпусная лингвистика. — СПб.: СПбГУ, 2005. 48 с.
11. Corpus linguistics: An international handbook / Eds. A. Lüdeling, M. Kytö. — Berlin/New York: Walter de Gruyter, 2008. Vol. 1. 794 p.
12. Corpus annotation: Linguistic information from computer text corpora / Eds. R. Garside, G. Leech, T. McEnergy. — London/New York: Routledge, 2013. 291 p.
13. Pustejovsky J., Stubbs A. Natural language annotation for machine learning. — Beijing/Cambridge/Farnham/Köln/Sebastopol/Tokyo: O'Reilly Media, 2013. 340 p.
14. Kübler S., Zinsmeister H. Corpus linguistics and linguistically annotated corpora. — London/New York: Bloomsbury, 2015. 320 p.
15. Handbook of linguistic annotation / Eds. N. Ide, J. Pustejovsky. — Dordrecht, The Netherlands: Springer Science + Business Media, 2017. 1468 p.
16. Зацман И. М., Инькова О. Ю., Кружков М. Г., Попкова Н. А. Представление кроссязыковых знаний о коннекторах в надкорпусных базах данных // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 1. С. 106–118.
17. Зацман И. М., Инькова О. Ю., Нуриев В. А. Построение классификационных схем: методы и технологии экспертного формирования // Научно-техническая информация. Сер. 2: Информационные процессы и системы, 2017. № 1. С. 8–22.
18. Baker P., Hardie A., McEnergy T. A glossary of corpus linguistics. — Edinburgh, U.K.: Edinburgh University Press, 2006. 187 p.
19. Зацман И. М., Косарик В. В., Курчавова О. А. Задачи представления личностных и коллективных концептов в цифровой среде // Информатика и её применения, 2008. Т. 2. Вып. 3. С. 54–69.
20. Зацман И. М., Кружков М. Г., Лоцилова Е. Ю. 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.
21. Зацман И. М. Целенаправленное развитие систем лингвистических знаний: выявление и заполнение лакун // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 1. С. 91–98.
22. Zatsman I. Finding and filling lacunas in linguistic typologies // 15th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings. — Matera, Italy: Institute of Knowledge Asset Management, 2020. P. 780–793.
23. Zatsman I. Three-dimensional encoding of emerging meanings in AI-systems // 21st European Conference on Knowledge Management Proceedings. — Reading, MA, USA: Academic Publishing International Ltd., 2020. P. 878–887.
24. Zatsman I., Khakimova A. New knowledge discovery for creating terminological profiles of diseases // 22nd European Conference on Knowledge Management Proceedings. — Reading, MA, USA: Academic Publishing International Ltd., 2021. P. 837–846.
25. Zatsman I. A model of goal-oriented knowledge discovery based on human–computer symbiosis // 16th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings. — Rome, Italy: Arts for Business Institute, 2021. P. 297–312.
26. Зацман И. М. Формы представления нового знания, извлеченного из текстов // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 3. С. 83–90.

Поступила в редакцию 15.10.21

CAPTURING EVOLUTION OF LEXICOGRAPHIC KNOWLEDGE IN DYNAMIC CLASSIFICATION SYSTEMS

A. A. Goncharov, I. M. Zatsman, M. G. Kruzhkov, and E. Yu. Loshchilova

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

Abstract: The paper examines two problems that have to be addressed in order to capture the evolution of lexicographic knowledge. The lexicographic knowledge discussed in the paper is presented in the form of classification categories that are used to provide linguistic markup for textual data in information systems. Evolution of lexicographic data is considered based on the example of a supracorpora database (SCDB). The first problem deals with integration of the framework for capturing changes of semantic content of classification categories into the SCDB. The proposed solution to this problem involves integration of two new tables that capture information about temporal states of the classification categories and about change operations applied to those categories. The paper describes how these tables are integrated into the SCDB structure. The second problem deals with providing the user interface for application of changes to the classification categories. The interface implemented in the SCDB is described in detail. The proposed solutions can be scaled so that they would make it possible to capture evolution not only of lexicographic knowledge but of scientific knowledge in general if this knowledge can be represented in the form of a dynamic classification system.

Keywords: evolution of lexicographic knowledge; dynamic classification system; ontology versioning; linguistic annotation; reclassification of annotations

DOI: 10.14357/19922264210406

Acknowledgments

The reported study was funded by RFBR, project number 20-012-00166. 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., I. M. Zatsman, and M. G. Kruzhkov. 2019. Temporal’nye dannye v leksikograficheskikh bazakh znaniy [Temporal data in lexicographic databases]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(4):90–96.
2. Goncharov, A. A., I. M. Zatsman, and M. G. Kruzhkov. 2020. Evolyutsiya klassifikatsiy v nadkorporusnykh bazakh dannyykh [Evolution of classifications in supracorpora databases]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 14(4):108–116.
3. Goncharov, A. A., I. M. Zatsman, and M. G. Kruzhkov. 2021. Predstavlenie novykh leksikograficheskikh znaniy v dinamicheskikh klassifikatsionnykh sistemakh [Representing New Lexicographical Knowledge in Dynamic Classification Systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 15(1):86–93.
4. McGuinness, D. L. 2003. Ontologies come of age. *Spinning the Semantic Web: Bringing the World Wide Web to its full potential*. Eds. D. Fensel, J. Hendler, H. Lieberman, and W. Wahlster. Cambridge, MA: MIT Press. 171–194.
5. Ooi, V. B. Y. 1998. *Computer corpus lexicography*. Edinburgh, U.K.: Edinburgh University Press. 255 p.
6. Dobrovol’skiy, D. O., ed. 2021 (in press). *Nemetsko-russkiy slovar’ aktual’noy leksiki* [German–Russian dictionary: Actual vocabulary]. Moscow: Leksrus.
7. Dobrovol’skiy, D. O., and Anna A. Zalizniak. 2018. Nemetskie konstruktssii s modal’nymi glagolami i ikh russkie sootvetstviya: proekt nadkorporusnoy bazy dannyykh [German constructions with modal verbs and their Russian correlates: A supracorpora database project]. *Komp’yuternaya lingvistika i intellektual’nye tekhnologii: po mat-lam Mezhdunar. konf. “Dialog”* [Computer Linguistic and Intellectual Technologies: Conference (International) “Dialog” Proceedings]. Moscow. 17(24):172–184.
8. Dobrovol’skiy, D. O. 2020. Nemetskie modal’nye glagoly v parallel’nom korpuse i zadachi dvuyazychnoy leksikografii [German modal verbs in a parallel corpus and bilingual lexicography tasks]. *Germanskije yazyki: Tekst, korpus, and perevod* [German languages: Text, corpus, and translation]. Moscow: Institut yazykoznaniya RAS. 103–116.
9. Dobrovol’skiy, D. O., and Anna A. Zaliznyak. 2020. Russkie konstruktssii s potentsial’no modal’nym znacheniem po dannym parallel’nykh korpusov [Russian constructions with potentially modal meanings: An analysis based on parallel corpus data]. *Trudy Instituta russkogo yazyka im. V. V. Vinogradova* [V. V. Vinogradov Russian Language Institute Proceedings]. 35–49.
10. Zakharov, V. P. 2005. *Korpusnaya lingvistika* [Textbook of corpus linguistics]. St. Petersburg: SPbGU. 48 p.

11. Lüdeling, A., and M. Kytö, eds. 2008. *Corpus linguistics: An international handbook*. Berlin/New York: Walter de Gruyter. Vol. 1. 794 p.
12. Garside, R., G. Leech, and T. McEnery, eds. 2013. *Corpus annotation: Linguistic information from computer text corpora*. London/New York: Routledge. 291 p.
13. Pustejovsky, J., and A. Stubbs. 2013. *Natural language annotation for machine learning*. Beijing/Cambridge/Farnham/Köln/Sebastopol/Tokyo: O'Reilly Media. 340 p.
14. Kübler, S., and H. Zinsmeister. 2015. *Corpus linguistics and linguistically annotated corpora*. London/New York: Bloomsbury. 320 p.
15. Ide, N., and J. Pustejovsky, eds. 2017. *Handbook of linguistic annotation*. Dordrecht, The Netherlands: Springer Science + Business Media. 1468 p.
16. Zatsman, I. M., O. Yu. Inkova, M. G. Kruzhkov, and N. A. Popkova. 2016. Predstavlenie kross-yazykovykh znaniy o konnektorakh v nadkorpusnykh bazakh dannykh [Representation of cross-lingual knowledge about connectors in supracorpora databases]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(1):106–118.
17. Zatsman, I., O. Inkova, and V. Nuriev. 2017. The construction of classification schemes: Methods and technologies of expert formation. *Automatic Documentation Mathematical Linguistics* 51(1):27–41.
18. Baker, P., A. Hardie, and T. McEnery. 2006. *A glossary of corpus linguistics*. Edinburgh, U.K.: Edinburgh University Press. 187 p.
19. Zatsman, I. M., V. V. Kosarik, and O. A. Kurchavova. 2008. Zadachi predstavleniya lichnostnykh i kollektivnykh kontseptov v tsifrovoy srede [Representation of individual and collective concepts in digital medium]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 2(3):54–69.
20. 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.
21. Zatsman, I. M. 2019. Tselenapravlennoe razvitiye sistem lingvisticheskikh znaniy: vyyavlenie i zapolnenie lakun [Goal-oriented development of linguistic knowledge systems: Identifying and filling of lacunae]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(1):91–98.
22. Zatsman, I. 2020. Finding and filling lacunas in linguistic typologies. *15th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings*. Matera, Italy: Institute of Knowledge Asset Management. 780–793.
23. Zatsman, I. 2020. Three-dimensional encoding of emerging meanings in AI-systems. *21st European Conference on Knowledge Management Proceedings*. Reading, MA: Academic Publishing International Ltd. 878–887.
24. Zatsman, I., and A. Khakimova. 2021. New knowledge discovery for creating terminological profiles of diseases. *22nd European Conference on Knowledge Management Proceedings*. Reading, MA: Academic Publishing International Ltd. 837–846.
25. Zatsman, I. 2021. A model of goal-oriented knowledge discovery based on human–computer symbiosis. *16th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings*. Rome: Arts for Business Institute. 297–312.
26. Zatsman, I. M. 2021. Formy predstavleniya novogo znaniya, izvlechennogo iz tekstov [Forms representing new knowledge discovered in texts]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 15(3):83–90.

Received October 15, 2021

Contributors

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

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

Kruzhkov Mikhail G. (b. 1975) — senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; magnit75@yandex.ru

Loshchilova Elena Yu. (b. 1960) — principal specialist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; lena0911@mail.ru

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАСЧЕТА СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ*

К. К. Абгарян¹, Е. С. Гаврилов²

Аннотация: Использование композиционных материалов нашло широкое применение в различных отраслях инженерной деятельности, что обусловлено их преимуществами перед металлами при равных механических и эксплуатационных свойствах. Для решения задач, возникающих в области создания композиционных материалов с набором заданных свойств, сегодня широко применяются новые подходы к разработке математических моделей и информационных систем на их основе. В данной работе представлена оригинальная многомасштабная математическая модель, которая позволяет рассчитывать структурные характеристики композиционных материалов и может быть использована для численного исследования усталостного разрушения композиционных материалов при случайных ударных повреждениях. На базе данной многомасштабной модели была создана распределенная информационная система для проведения широкомасштабных исследований в области моделирования композиционных материалов с заданными свойствами. Развитие данного подхода в дальнейшем поможет обеспечить формирование информации для обоснованного выбора композиционных материалов с заданными свойствами для авиационно-космической и других областей промышленности.

Ключевые слова: многомасштабное моделирование; композиционные материалы; интеграционная платформа; программный комплекс; распределенная система

DOI: 10.14357/19922264210407

1 Введение

На сегодня одной из важнейших и актуальных проблем, решаемых в процессе создания летательных аппаратов, стала задача обеспечения их прочности при минимальных весовых затратах и отсутствии коррозии, что обуславливает все более широкое применение композиционных материалов для производства основных силовых элементов. Однако с расширением использования композиционных материалов, которые имеют высокие характеристики усталостной долговечности и не подвержены коррозии, проявились проблемы, связанные, например, с необходимостью учета случайных ударных воздействий. На сегодня они представляются одними из основных факторов риска при создании авиационных конструкций из композиционных материалов. Для решения задач, возникающих в области создания композиционных материалов с набором заданных свойств, широко применяются новые подходы к построению математических моделей и информационных систем на их основе. В ведущих международных и российских цент-

рах проводятся широкомасштабные исследования в данной области. Так, во ФГУП ВНИИ ВИАМ сформулирована необходимость систематизации накопленных данных по проведенным исследованиям зависимостей «состав–свойства» для создания математических моделей и прогнозирования свойств новых материалов. Планируется создание экспериментально-расчетной базы для квалификации отечественных материалов в Европе (EASA, European Union Aviation Safety Agency), а также по американским требованиям и нормам (FAA, Federal Aviation Administration) (<https://viam.ru/news/2013>).

К программным комплексам, наиболее широко используемым в авиационной промышленности при построении виртуальных моделей композитных конструкций на стадиях проектирования, анализа и производства, можно отнести:

- комплекс мирового уровня в области конечно-элементных расчетов на прочность ABAQUS;
- современное программное обеспечение для инженерного анализа и численного моделирования Ansys;

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 075-15-2020-799).

¹ Федеральное исследовательское учреждение «Информатика и управление» Российской академии наук; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), kristal83@mail.ru

² Федеральное исследовательское учреждение «Информатика и управление» Российской академии наук; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), eugavrilov@gmail.com

— программный комплекс MSC Nastran для анализа методом конечных элементов (FEA, Finite Element Analysis), первоначально разработанный для NASA, исходный код NASTRAN в настоящее время интегрирован в ряд различных программных пакетов.

Программные комплексы позволяют учитывать свойства материалов, из которых состоит композитный пакет, такие как изотропность, ортотропность, анизотропность и др. Важно, что большинство из них, отражая философию открытых систем, позволяют встраивать разработанные пользователем модули в программный комплекс. Например, можно включить метод собственной разработки процесса имитации производства композиционных материалов.

Необходимо отметить, что при проектировании композитных конструкций очень важны прочностные расчеты. Все ведущие пакеты автоматизации инженерных задач (CAE, Computer Aided Engineering) предоставляют возможность проводить линейные и нелинейные статические прочностные расчеты, моделирование пластичности и ползучести, усталости и др.

Также доступно моделирование разрушения конструкций — как на макроуровне, так и на микроуровне. Все представленные CAE-системы дают возможность оценивать прочность композита с помощью различных критериев разрушения. Обычно ведущие системы охватывают весь процесс технологического производства композитных конструкций. Программные комплексы включают в себя базы данных со свойствами различных материалов. Для композитов есть возможность выбрать тип композита со стандартными свойствами (угле-, стекло-, органопластики на основе эпоксифенолформальдегидных, кремнийорганических смол; эпоксидные боропластики и т. д.). Имеется возможность коррекции данных свойств и внесения материала с новыми свойствами в базы данных. Технологический процесс производства композитов имитируется в системах в отдельных модулях.

В связи с такой организацией систем (когда базы знаний входят в систему CAE) не имеет смысла изобретать какое-то отдельное решение с отдельной базой знаний. Необходимо включить ее в программный комплекс, как это сейчас делается у ведущих производителей.

Однако следует отметить, что, несмотря на такие большие возможности существующих программных систем, моделей, позволяющих с высокой степенью достоверности прогнозировать инициацию трещины, ее рост и остаточную прочность, пока нет. Поэтому для нивелирования данного пробле-

ла используются конструктивные решения, предотвращающие возникновение недопустимо высоких нормальных напряжений. При таком подходе на первое место при проектировании выходят не свойства материала, а естественные концентраторы.

Задачи, связанные с изучением структурных особенностей современных композиционных материалов с заданными свойствами, их изменениями в процессе эксплуатации, относятся к сложным многомасштабным проблемам. Вследствие своей огромной ресурсоемкости они требуют постоянного увеличения вычислительных возможностей аппаратных средств и обновления высокоэффективных программных решений с применением распределенных вычислений.

2 Многомасштабная модель для расчета структурных свойств композиционных материалов

При изучении многомасштабных научных проблем, включающих в себя явления несопоставимых пространственных и/или временных масштабов необходимо учитывать все факторы, играющие в них ключевые роли. Для решения таких проблем необходимо в рамках одной вычислительной задачи рассчитать несколько различных сопряженных между собой физических процессов с разных масштабных уровней.

Для расчета структурных характеристик композиционных материалов была построена оригинальная многомасштабная математическая модель, которая может быть применена не только для изучения свойств композиционных материалов с заданной структурой и составом, но и для анализа динамических процессов, в том числе для численного исследования усталостных разрушений при случайных ударных повреждениях. Для ее описания используется теоретико-множественный аппарат, представленный в [1, 2], определяется необходимое в соответствии с поставленной задачей число масштабных уровней. Далее физико-математическим моделям, распределенным по таким уровням, ставятся в соответствие базовые модели-композиции (БК) — цифровые аналоги, передающие сущность вычислительных процессов, которые реализуются. Структура БК передается с помощью таблицы данных [1, 2].

Такое представление полностью описывает структуру БК и задает шаблон, который заполняется конкретными данными при создании реальных

экземпляров БК для решения практических задач математического моделирования композиционных материалов.

Согласно терминологии из [1, 2], под многомасштабной композицией (МС) понимается однопараметрическое семейство, полученное из экземпляров БК с разных масштабных уровней за счет объединения в общем вычислительном процессе их основных множеств разного структурного типа, включая данные (входные и выходные) и методы их обработки. Например:

- МС₁₂^A : {V₁₂^A, X₁₂^A, MA₁₂^A} — обозначение БК для проведения квантово-механических расчетов;
- МС₂₂^A : {V₂₂^A, X₂₂^A, MA₂₂^A} — обозначение БК для проведения молекулярно-динамических расчетов.

Такой подход позволяет оперативно создавать и модифицировать с учетом дополнительных требований набор многомасштабных композиций для решения связанных задач, таких как

- многомасштабное моделирование процессов зарождения, формирования и трансформации во времени различных видов и концентраций дефектов в композиционных материалах, а также их макроразрушение;
- численное исследование усталостных разрушений в процессе случайных ударных повреждений;
- построение математических моделей «состав–свойство» для прогнозирования характеристик, влияющих на эксплуатационные свойства материала.

Разработанные многомасштабные композиции составляют основу многомасштабной модели для расчета структурных характеристик новых композиционных материалов.

На рис. 1 представлена общая схема многомасштабной композиции для расчета структурных характеристик композиционных материалов.

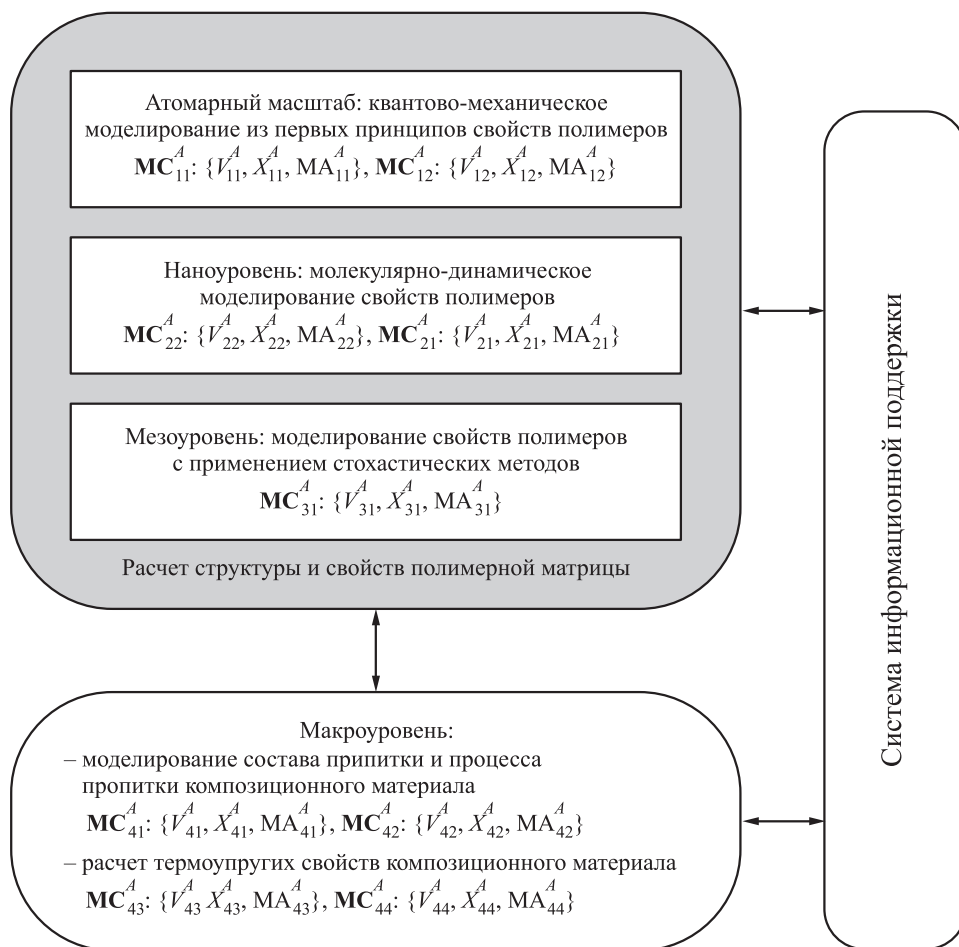


Рис. 1 Схема многомасштабной модели для расчета структурных характеристик новых композиционных материалов

3 Распределенная информационная система

Для решения практических задач многомасштабного моделирования в области композиционных материалов актуальна разработка программных комплексов, развернутых на высокопроизводительных кластерах, которые предоставляют исследователям возможность проводить многоуровневые расчеты с применением распределенных ресурсов, используя при этом как собственные программные разработки, так и пакеты прикладных программ, например для проведения квантово-механических расчетов [3], такие как VASP (<https://www.vasp.at>) и Quantum Espresso (<https://www.quantum-espresso.org>).

В данной работе представлена распределенная информационная система и средства ее разработки, базирующиеся на многомасштабном подходе.

Необходимо отметить, что при построении программного комплекса для решения конкретных задач используются как программные модули собственной разработки, в которых реализованы оригинальные численные решения созданных физико-математических моделей, так и готовые программные модули. В его основе лежит ин-

теграционная платформа для многомасштабного моделирования, которая объединяет информационные потоки на разных масштабных уровнях. При решении конкретной задачи, такой как расчет структурных особенностей композиционного материала или изучение процессов его деградации и разрушения, выделяются конкретные уровни моделирования, которые необходимо задействовать, и строится многомасштабная композиция — информационный аналог многомасштабной физико-математической модели. Для программной реализации на базе интеграционной платформы из имеющихся программных модулей формируется вычислительный комплекс.

Перечислим пользовательские роли в интеграционной платформе многомасштабного моделирования:

- разработчик вычислительных модулей реализует расчетный модуль или осуществляет конфигурирование прикладного пакета;
- системный разработчик создает веб-сервисы для вычислительного модуля и интегрирует его в платформу;
- разработчик расчетных сценариев создает сценарии в среде моделирования;

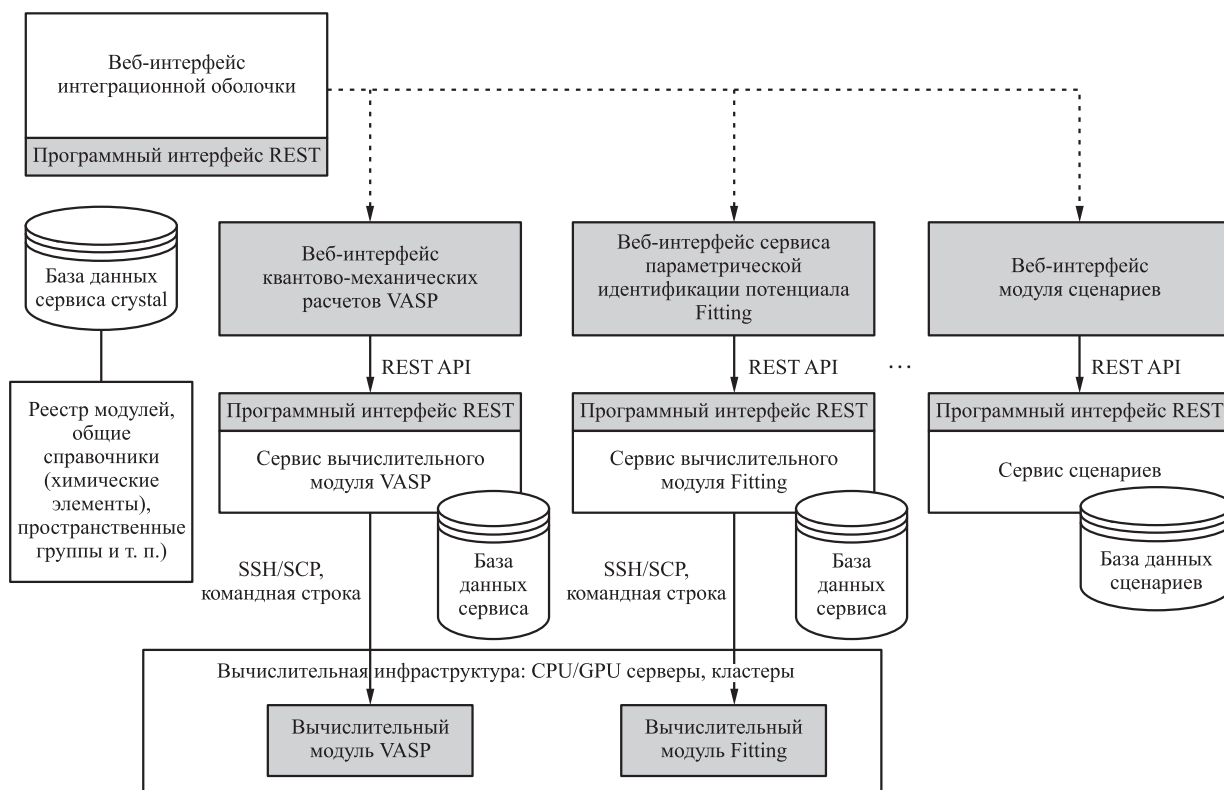


Рис. 2 Архитектура распределенной информационной системы

- ученый-исследователь прикладной области запускает расчетные сценарии с различными параметрами и анализирует результаты.

Рассмотрим общую архитектуру распределенной информационной системы, представленной на рис. 2.

Информационная система состоит из типовых сервисов вычислительных модулей, общей интеграционной оболочки и модулей сценариев. Типовой сервис вычислительного модуля включает сам вычислительный модуль, развернутый на высокопроизводительном кластере или сервере, и соответствующий сервис с программным интерфейсом (опционально) веб-интерфейсом пользователя.

Вычислительный модуль представляет собой исполняемый файл (консольное приложение) на Linux или Windows, работающий в пакетном режиме и выполняющий расчеты по заданным параметрам. Примеры: пакет VASP, LAMMPS, Quantum Espresso, собственные реализации на C++, Fortran. Сервис вычислительного модуля представляет собой приложение, обеспечивающее универсальный программный интерфейс в виде HTTP REST сервисов для ввода параметров, запуска и захвата результатов вычислений.

Если вычислительному модулю требуются справочные данные, адаптер предоставляет их из базы данных либо из своих файлов-ресурсов. Метаданные модуля содержат информацию о названиях, типах входных параметров и результатов для дальнейшего использования в сценариях и передачи данных между модулями.

В дальнейшем планируется наращивание встраиваемых в интеграционную платформу вычислительных модулей, что позволит существенно расширить класс решаемых задач и возможности реализации программных решений в области вычислительного материаловедения [4–6].

Для реализации возможностей ролей разработчика расчетных сценариев и ученого-исследователя были составлены требования к движку сценариев, на основе которых были сформулированы критерии выбора основы для его реализации.

1. Интерфейс для пользователей и его функциональность:

- наличие средства моделирования процессов;
- возможность визуализации исполнения процессов;
- просмотр результата расчета для выполненных и выполняющихся сценариев;
- возможность указать параметры запуска сценария;

- возможность перезапуска сценария с теми же параметрами.

2. Поддержка платформы:

- возможность отладки и диагностики выполнения сценариев программистом;
- легкость решения и его инфраструктуры для разработчика;
- легкость решения и его инфраструктуры для администратора в промышленной эксплуатации;
- лицензия, наличие открытого исходного кода;
- доступность специалистов, знающих язык, продукт, стандарт, технологию;
- скорость обучения специалиста.

3. Простота для конечных пользователей:

- простота развертывания нового сценария;
- простота отладки и тестирования сценариев для ученых-исследователей.

4. Расширение платформы:

- простота синхронной и асинхронной интеграции с расчетными модулями (сервисами);
- удобство ручного и автоматического тестирования интеграции с расчетными сервисами;
- наличие развитого программного интерфейса.

По данным критериям были оценены существующие программные продукты следующих категорий.

1. Автоматизация бизнес-процессов. Категория продуктов, реализующих стандарт BPMN (Business Process Model and Notation) (<https://www.bpmn.org>), широко использующийся для описания и моделирования процессов, представляющих граф выполнения ручных (задач для пользователей) и автоматических действий. В автоматизации бизнес-процессов ключевым аспектом выступает последовательность выполнения задач, составляющих процесс, а передача данных между задачами не регламентируется. Среди лидеров рассматривались следующие продукты:

- (a) Activiti BPM (<https://www.activiti.org>);
- (b) Camunda BPM (<https://camunda.com/products/camunda-platform>);

- (в) Flowable BPM (<https://www.flowable.com>) и CMMN;
- (г) jBPM (<https://www.jbpm.org>).

Из этой группы по предъявляемым критериям отбора лучше всего подходит Camunda BPM, в том числе за счет наличия простого, но достаточного по функциональности приложения для разработки сценариев без написания кода.

2. Автоматизация работы с потоками данных. Для этой категории продуктов ключевым элементом представляются поступающие на вход данные, для которых определяется асинхронный направленный граф (DAG, Directed Acyclic Graph) операций для их трансформации. Продукты этой категории используются для сбора, трансформации и консолидации данных в хранилищах или облаках данных и в основном ориентированы на аналитиков данных или разработчиков баз данных. Рассматривались следующие реализации:

- (а) Apache Airflow — одно из самых популярных решений, особенность которого заключается в описании DAG на Python, но практически отсутствует адекватная визуализация как на этапе создания, так и на этапе выполнения сценария;
- (б) Apache Beam;
- (в) Nextflow.io;
- (г) Temporal.io;
- (д) Prefect.

Хотя по критериям отбора Apache Airflow набрал примерно такое же число баллов, что и Camunda BPM, предпочтение было отдано последнему за счет лучшего средства визуального проектирования. С одной стороны, движки Data Flow рассчитаны на работу в пакетном режиме и содержат встроенные средства распараллеливания, автоматического перезапуска и другие полезные функции для сценариев научных расчетов. С другой стороны, они могут привести ограничения при управлении данными расчетов, не дав возможности реализовать специфику многомасштабного моделирования.

3. Автоматизация научных расчетов. Наиболее близкие по тематике продукты, к сожалению, имеют достаточно ограниченную функциональность, недостаточную гибкость и неподходящие лицензии:

- (а) Knime Analytics Platform — реализует достаточно большую часть необходимых функций, больше ориентирован на работу с потоками данных для data science. К сожалению, открытая и бесплатная версия доступна только в варианте настольного приложения, которое не масштабируется под задачи вычислительного моделирования материалов;
- (б) Everest (<http://everest.distcomp.org>, разработка ИППИ РАН) предоставляет инфраструктуру для запуска вычислительных задач в гетерогенных вычислительных кластерах. Присутствуют элементы оркестрации задач — задание варьируемого параметра, более сложная оркестровка задач в виде скриптов пишется программистом на Python API. К сожалению, имеет закрытые исходные коды и не очень активно развивается;
- (в) Modelica, OpenModelica — язык и реализация для описания математических моделей. Содержит множество интересных идей, но все модули должны быть описаны на языке Modelica, в то время как в области вычислительного материаловедения используются пакеты VASP (<https://www.vasp.at>), QuantumEspresso (<https://www.quantum-espresso.org>) и др., оформленные в виде отдельных приложений на Fortran, C++.

В результате отбора по исходным критериям был выбран подход к моделированию сценариев как бизнес-процессов и его реализация в виде Camunda BPM.

Рассмотрим предлагаемую архитектуру комплекса с акцентом на модули, отвечающие за исполнение сценариев (рис. 3).

В составе подсистемы сценариев реализуются следующие модули.

1. *Сервис выполнения сценариев* — ключевой компонент, отвечающий за логику работы сценариев (используется движок Camunda BPM), а также за хранение и обмен данными.
2. *База данных сценариев* — хранилище данных на системе управления базами данных MongoDB, в котором находятся оперативные данные исполняющихся и уже завершенных экземпляров сценариев.
3. *Camunda BPM Engine* — готовый продукт, отвечающий за хранение BPM-диаграмм сценариев, их запуск и отслеживание статуса выполнения.
4. *Camunda Modeler* — настольное приложение для создания новых сценариев (дизайнер BPMN-

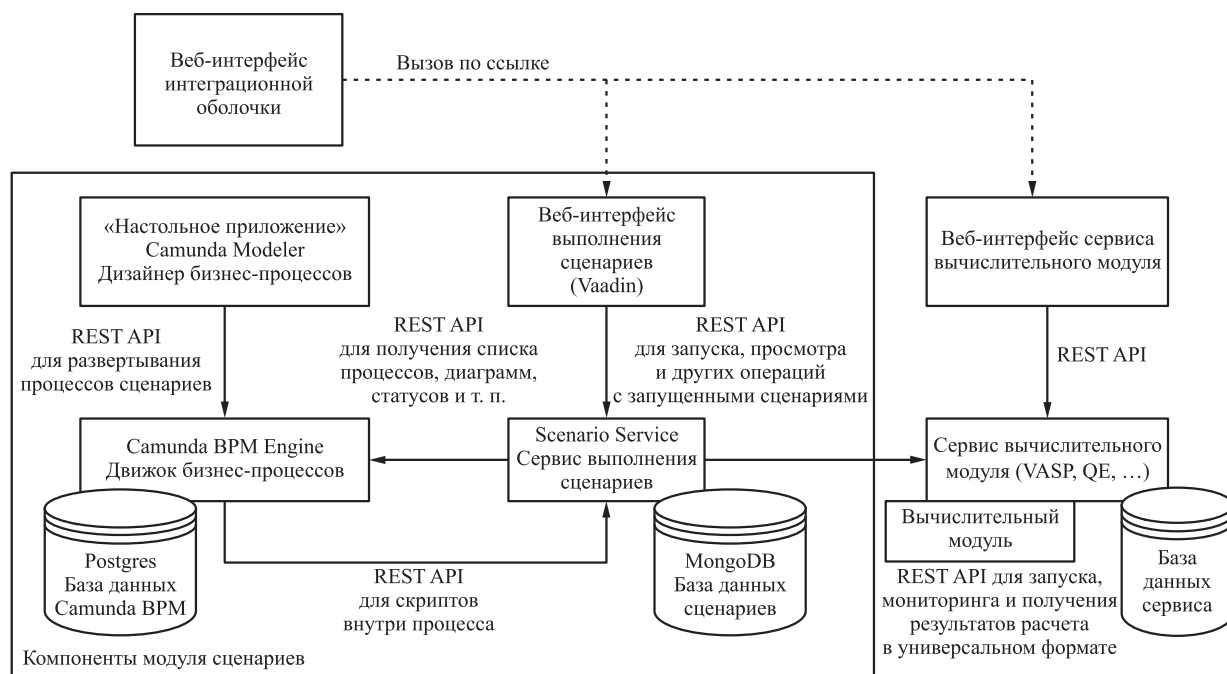


Рис. 3 Компоненты архитектуры модуля сценариев

процессов). Готовый продукт, который будет расширяться по необходимости.

5. *База данных Camunda BPMN* — хранит диаграммы, запущенные сценарии и их статусы.
6. *Веб-интерфейс выполнения сценариев* — интерфейс для пользователей, позволяющий просматривать, запускать, отслеживать выполнение и просматривать/скачивать результаты работы сценариев.

Сервис сценариев работает с сервисами вычислительных модулей по стандартизованному протоколу на основе «словаря данных», а в BPMN вызовы модулей представляются в виде «внешних задач» (external tasks), контроль за исполнением которых лежит на сервисе сценариев.

Рассмотрим представление примера расчетного сценария в нотации BPMN (рис. 4).

В начале процесса находится элемент, в свойствах которого задается список ожидаемых входных параметров от пользователя. Так как весь процесс работает в пакетном режиме, то все необходимые для работы всех модулей входные параметры (которые невозможно вычислить в самом сценарии) должны либо задаваться пользователем перед началом выполнения, либо быть зафиксированными автором сценария в самой диаграмме.

Далее обозначены следующие типы элементов:

- *Запуск вычислительного модуля* («VASP», «Фиттинг», «Молекулярная динамика»), который

представляется элементом типа «сервисная задача» (service task), что означает ее автоматическое выполнение без взаимодействия с человеком. В данном случае все задачи имеют подтип «внешняя сервисная задача», где в качестве «темы» (topic) указывается код вычислительного модуля (например, «vasp», «qe», «fitting»). В зависимости от этого значения сервисом сценария будет запускаться соответствующий вычислительный модуль;

- *Пользовательский скрипт* («вычисление типов потенциала») — фрагмент кода на одном из поддерживаемых скриптовых языков программирования (JavaScript, Groovy, Python), позволяющий авторам сценария добавлять произвольную логику обработки данных или вычисления параметров, специфичную для конкретного сценария;
- *Подпроцесс-цикл* (блок «Фиттинг» — «молекулярная динамика») — запуск подпроцесса в итерации по указанному параметру. Возможно указание уровня параллелизма («loop cardinality») — максимальное число итераций, которое можно запустить параллельно;
- *Элемент завершения сценария* — формальный элемент, переводящий экземпляр сценария в состояние «завершен».

Таким образом, у пользователей есть возможность создавать и редактировать сценарии выпол-

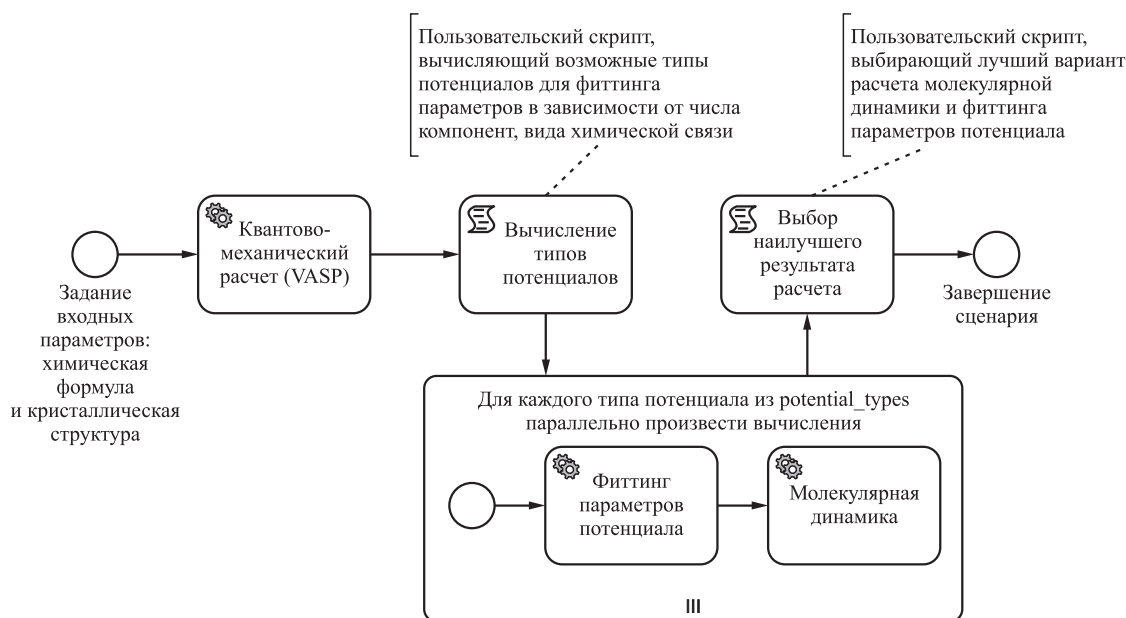


Рис. 4 Пример расчетного сценария

нения расчетов с ветвлениями, слияниями, циклами и другими элементами, предусмотренными стандартом BPMN. Из ограничений следует отметить, что в настоящий момент не предусмотрено использование пользовательских задач внутри процесса, т. е. остановка сценария для ожидания ввода данных пользователем.

4 Выводы

Разработанные подходы составляют основу многомасштабной модели, сформированной для расчета структурных характеристик новых композиционных материалов. Для компьютерной реализации многомасштабной модели была построена распределенная информационная система, которая позволяет интегрировать разные программные модули в общий вычислительный процесс и проводить при необходимости их запуск по заданным сценариям в параллельном режиме на разных вычислительных средствах соответственно решаемой задаче. Показано, что создание кроссплатформенной, расширяемой интеграционной системы, предназначенной для решения задач многомасштабного моделирования на высокопроизводительных вычислительных кластерах, позволяет оперативно создавать распределенные информационные системы для решения конкретных задач в области материаловедения композиционных материалов.

Данный подход существенно расширяет возможности проведения исследований в области мно-

гомасштабного моделирования композиционных материалов и позволяет во многих случаях существенно ускорить процесс разработки программных решений с использованием высокопроизводительных программных средств для практических задач.

Литература

1. Абгарян К. К. Многомасштабное моделирование в задачах структурного материаловедения. — М.: МАКС Пресс, 2017. 284 с.
2. Абгарян К. К. Информационная технология построения многомасштабных моделей в задачах вычислительного материаловедения // Системы высокой доступности, 2018. Т. 14. № 2. С. 9–15.
3. Kohn W., Sham L. J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects // Phys. Rev. A, 1965. Vol. 140. No. 4. P. 1133–1138.
4. Абгарян К. К., Гаврилов Е. С., Марасанов А. М. Информационная поддержка задач многомасштабного моделирования композиционных материалов // Int. J. Open Information Technologies, 2017. Vol. 5. Iss. 12. P. 24–29.
5. Абгарян К. К., Гаврилов Е. С. Информационная поддержка интеграционной платформы многомасштабного моделирования // Системы и средства информатики, 2019. Т. 29. № 1. С. 53–62.
6. Абгарян К. К., Гаврилов Е. С. Интеграционная платформа для многомасштабного моделирования нейроморфных систем // Информатика и её применения, 2020. Т. 14. Вып. 2. С. 104–111.

Поступила в редакцию 28.10.21

DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM FOR CALCULATING THE STRUCTURAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS

K. K. Abgaryan^{1,2} and E. S. Gavrilov^{1,2}

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

²Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125080, Russian Federation

Abstract: The use of composite materials has found wide application in various branches of engineering due to their advantages over metals with equal mechanical and operational properties. To solve the problems arising in the field of creating composite materials with a set of specified properties, new approaches to the development of mathematical models and information systems based on them are widely used today. The paper presents an original multiscale mathematical model that allows calculating the structural characteristics of composite materials and can be used to numerically study fatigue fracture of composite materials in case of accidental impact damage. On the basis of this multiscale model, a distributed information system was created for conducting large-scale research in the field of modeling composite materials with specified properties. The development of this approach in the future will help to ensure the formation of information for a reasonable choice of composite materials with desired properties for aerospace and other industries.

Keywords: multiscale modeling; composite materials; integration platform; software package; distributed system

DOI: 10.14357/19922264210407

Acknowledgments

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-15-2020-799).

References

1. Abgaryan, K. K. 2017. *Mnogomasshtabnoe modelirovaniye v zadachakh strukturnogo materialovedeniya* [Multiscale modeling for structural materials science applications]. Moscow: MAKS Press. 284 p.
2. Abgaryan, K. K. 2018. Informatsionnaya tekhnologiya postroyeniya mnogomasshtabnykh modeley v zadachakh vychislitel'nogo materialovedeniya [Information technology is the construction of multi-scale models in problems of computational materials science]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 14(2):9–15.
3. Kohn, W., and L. J. Sham. 1965. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Phys. Rev. A* 140(4):1133–1138.
4. Abgaryan, K. K., E. S. Gavrilov, and A. M. Marasanov. 2017. Informatsionnaya podderzhka zadach mnogo-
5. Abgaryan, K. K., and E. S. Gavrilov. 2019. Informatsionnaya podderzhka integratsionnoy platformy mnogomasshtabnogo modelirovaniya [Informational support of the multiscale modeling integration platform]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 29(1):53–62.
6. Abgaryan, K. K., and E. S. Gavrilov. 2020. Integratsionnaya platforma dlya mnogomasshtabnogo modelirovaniya neyromorfnykh sistem [Integration platform for multiscale modeling of neuromorphic systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 14(2):104–111.

Received October 28, 2021

Contributors

Abgaryan Karine K. (b. 1963) — Doctor of Science in physics and mathematics, principal scientist, A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; Head of Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125080, Russian Federation; kristal83@mail.ru

Gavrilov Evgeny S. (b. 1982) — scientist, A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; senior lecturer, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125080, Russian Federation; eugavrilov@gmail.com

О МЕТОДАХ ПЕРЕНОСА ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ*

Е. Ю. Щетинин¹, Л. А. Севастьянов²

Аннотация: Проведены компьютерные исследования эффективности применения методов переноса глубокого обучения для решения задачи распознавания опухолей головного мозга человека на основе его МРТ-снимков. Предложены и реализованы различные стратегии глубокого обучения и тонкой настройки моделей. В качестве базовых моделей были использованы глубокие сверточные сети VGG-16, ResNet-50, Xception и MobileNetV2, предварительно обученные на наборе изображений ImageNet. Также разработана и обучена глубокая сверточная нейронная сеть 2D-CNN. Компьютерный анализ показателей их производительности показал, что стратегия тонкой настройки модели Xception на расширенном наборе данных продемонстрировала более высокие значения точности по сравнению с другими моделями глубокого обучения: точность классификации опухолей головного мозга по МРТ-снимкам составила 96%, precision — 99,9%, recall — 96,03%, f1-score — 98%, AUC — 98,92%.

Ключевые слова: МРТ-снимки; опухоль головного мозга; перенос глубокого обучения; сверточные нейронные сети

DOI: 10.14357/19922264210408

1 Введение

В последние годы глубокие сверточные нейронные сети (convolutional neural networks, CNN) продемонстрировали впечатляющие успехи в самых разнообразных задачах цифровой медицины [1, 2]. В области рентгенографии и медицинской визуализации CNN используются в анатомии и физиологии для сегментации анатомических структур и органов, поражений тканей и т. д. Магнитно-резонансная томография (МРТ) стала одним из общепринятых медицинских методов диагностики опухолей различного происхождения. Рентгенолог обычно проводит диагностику МРТ-снимков вручную, однако такая процедура может быть трудоемкой и ее результаты зависят от опыта врача. Кроме того, большое число МРТ-снимков невозможно просмотреть за короткое время и не допустить ошибки. Поэтому актуальным подходом становится разработка автоматизированных систем обработки и анализа МРТ-снимков.

На практике обучение CNN с нуля может оказаться достаточно сложной задачей, поскольку, как правило, невозможно иметь набор данных с достаточным числом образцов. Вместе с тем информация, полученная в результате обучения нейронной сети на одном или нескольких наборах данных, может быть использована для решения другой задачи и на других данных. Например, если нейронная сеть научилась распознавать объекты на изобра-

жениях, таких как повреждения кожи, эти знания могут быть использованы для идентификации других объектов в радиологической диагностике [3]. Такой подход в глубоком обучении называется переносом обучения, или трансферным обучением (Transfer Learning, TL) [4, 5].

Настоящая работа посвящена исследованиям эффективности применения методов TL в обнаружении опухолей головного мозга на основе анализа МРТ-снимков с использованием предварительно обученных глубоких сверточных нейронных сетей. Для проведения компьютерных экспериментов и возможности сравнения производительности использовались нейронные сети с предварительно обученными весами на базе данных ImageNet (набор данных из 15 млн маркированных изображений высокого разрешения, принадлежащих более чем 22 000 категориям) [6]. Цель работы состояла в разработке эффективных стратегий обучения и тонкой настройки глубоких нейронных сетей для распознавания опухолей головного мозга человека с высокой точностью.

2 Методы переноса обучения в распознавании изображений

Наиболее известный метод переноса обучения состоит в том, что в качестве базовой модели клас-

* Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

¹ Финансовый университет при Правительстве РФ, rivierra-molto@mail.ru

² Российский университет дружбы народов; Объединенный институт ядерных исследований, leonid.sevast@gmail.com

сификатора используется одна из предварительно обученных глубоких сверточных сетей, у которой заморожены (отключены) все сверточные (Convolutional) и пулинг (Pooling) слои, а также удалены выходные слои, отвечающие за настройки классификатора тех данных, на которых она была обучена. Под операцией заморозки здесь понимается процедура фиксации значений весов сверточных слоев таким образом, что они не будут обновляться во время обучения модели. Далее к базовой модели подключается слой выравнивания (Flatten), несколько полностью связанных слоев (Fully Connected Layers) с прореживанием и плотных слоев (Dense Layers) с целью избежать переобучения. Наконец, к модели присоединяются последний полностью связанный слой с функцией активации «softmax» с указанием необходимого числа классов и выполняется ее компиляция. Построенная таким образом модель может быть уже обучена для решения конкретной поставленной задачи.

Еще один подход связан с необходимостью тонкой настройки модели (Fine Tuning Model) [7]. В то время как в вышеописанном методе классификатор просто подключается к предварительно обученной нейронной сети, тонкая настройка вносит в нее изменения таким образом, чтобы она была более адаптируемой и эффективной в решении поставленной задачи, например путем последовательного подключения замороженных сверточных слоев модели и оптимизации ее параметров.

В работе предложен следующий алгоритм тонкой настройки параметров нейронной сети:

- (1) загрузить базовую модель с ее весами, обученными на базе ImageNet;
- (2) заменить ее последний полностью связанный слой новым полностью связанным слоем;
- (3) заморозить слои модели до последнего сверточного блока базовой модели;
- (4) переучить последний блок свертки и полностью связанные слои с подбором скорости обучения.

Стратегия обучения построенной таким образом модели глубокой нейронной сети существенно зависит от ряда факторов. Если используемый набор данных велик по размерам и похож на ImageNet, то предварительно обученная модель будет хорошим решением для поставленной задачи. При реализации модели классификатора на ее основе в качестве дополнительных слоев необходимо использовать нужное число плотных слоев. Если новый набор данных невелик, но похож на ImageNet, то следует применить классический метод переноса обучения. В этом случае также настройка сети

будет рассматриваться как обучение классификатора.

Если набор данных мал и сильно отличается от набора изображений ImageNet, то наилучшей стратегией настройки модели будет ее обучение с последовательным размораживанием сверточных слоев предобученной модели, начиная с последнего, до тех пор пока не будет достигнута приемлемая точность классификации на используемом наборе изображений. Если набор данных достаточно велик, но значительно отличается от ImageNet, то лучшей стратегией будет обучение модели глубокой сверточной сети с нуля, однако по-прежнему инициализировать ее следует весами из ImageNet.

Существует ряд предварительно обученных моделей, которые можно использовать для классификации изображений МРТ с помощью предложенных выше стратегий передачи обучения. Их выбор был связан как с их популярностью у исследователей, так и с желанием применить наиболее современные и эффективные из них.

3 Описание наборов исследуемых данных и их предварительная обработка

В качестве базы данных для сравнительного анализа производительности исследуемых моделей глубокого обучения в работе использовались наборы МРТ-снимков головного мозга из работы [8]. В наборе имеются 253 изображения, 155 из которых принадлежат классу «Tumor» (опухоль), а 98 изображений — классу «No Tumor» (нет опухоли). Поскольку используемые предварительно обученные модели требуют, чтобы изображения имели размеры $224 \times 224 \times 3$ пикселей, то изображения из набора данных были приведены к этому формату.

Объем исходного набора данных был очень мал, что могло привести к большим ошибкам в прогнозах модели [9]. Чтобы решить эту проблему, использован метод расширения данных (data augmentation) [10]. Используя этот метод, можно увеличить размер данных в несколько раз. После введения вариации в обучающий набор данных модель становится обобщенной и, как следствие, менее склонной к переобучению. Расширенный набор изображений, таким образом, содержал 2064 изображения, в том числе 1085 изображений класса «Tumor» и 979 изображений класса «No Tumor». Далее он был разделен на обучающую (train_set, 1444 снимков), проверочную (test_set, 310 снимков) и тестовую (valid_set, 310 снимков) выборки.

4 Компьютерные эксперименты по применению методов трансферного обучения в распознавании опухолей головного мозга

Были проведены компьютерные эксперименты по применению предложенных выше стратегий переноса глубокого обучения для распознавания опухолей головного мозга на описанном выше наборе МРТ-снимков. Для этого в качестве базовых моделей обучения были выбраны глубокие сверточные сети VGG-16, MobileNetV2, Xception и ResNet-50 [11–14]. Прежде всего было необходимо импортировать веса базовых моделей из библиотеки ImageNet и «заморозить» их, установив значение параметра обучения для каждого сверточного слоя как «False». Далее следовало создать модель Sequential из библиотеки глубокого обучения Keras [15]. Затем последовательно присоединить к замороженным слоям предобученной модели слой выравнивания Flatten, два плотных слоя с функциями активации «relu» и «softmax» соответственно, разделенных слоями прореживания Dropout(0.2), и слой BatchNormalization, чтобы избежать переобучения. Кроме того, было необходимо изменить выходной слой предварительно обученных моделей, поскольку он был настроен на классификацию 1000 классов изображений, а в вычислительном эксперименте присутствовали только два класса («Tumor» и «No Tumor»).

Обучение построенной таким образом модели проводилось с функцией потерь «binary_crossentropy» и показателями точности accuracy, precision, recall, f1-score и AUC (Area Under Curve) [9, 15]. Начальная скорость обучения была установлена равной $1e - 4$, и модель обучалась в течение 20 эпох с параметром batch_size = 20. После обучения выбиралась лучшая предварительно обученная модель на основе вышеуказанных метрик точности, полученных на тестовом наборе (test_set).

В таблице приведены показатели точности классификации на тестовом наборе МРТ-снимков головного мозга человека для двух классов («Tumor» и «No Tumor»). Для сравнения результатов TL также была построена и обучена глубокая сверточная нейронная сеть, состоящая из трех последовательно соединенных сверточных блоков, каждый из которых содержал 2D-CNN сверточный слой, слой BatchNormalization и слой Dropout(0.2). Результаты ее обучения также приведены в таблице. На этом этапе компьютерных экспериментов были выявлены две модели, показавшие наилучшую производительность по сравнению с остальными. Ими оказались модели VGG-16 и Xception с показателями точности accuracy, precision и recall, равными 91,42%, 95,2%, 91,4% и 94,11%, 94,44%, 97,2% соответственно.

Далее, на втором этапе, для этих моделей были реализованы стратегии тонкой настройки. Для модели Xception был применен метод 5-блочной перекрестной проверки и построены оценки accuracy, precision, recall, AUC. Они оказались выше, чем в базовой стратегии переноса обучения. При этом точность классификации возросла до значений 98%, precision — 99,9%, recall — 96,03%, а показатель AUC оказался равен 98,92%. Точность классификации МРТ-снимков из класса «Tumor» составила 96%, точность классификации МРТ-снимков из класса «No Tumor» составила 100%.

Затем была проведена тонкая настройка базовой модели VGG-16 следующим образом. Была реализована последовательная модель библиотеки Keras, в которую предварительно был включен сверточный слой Conv_2D с параметрами: kernel_size(3,3), padding = 'same', input_shape = (64, 64, 3). Затем присоединена базовая модель VGG-16 с весами, полученными в результате ее обучения на предыдущей стадии (базовая стратегия переноса обучения). Вслед за этим были последовательно присоединены слои GlobalAveragePooling2D, BatchNormalization и Dropout(0.25). Наконец, к модели были присоединены полносвязные слои, такие как Dense(units = 512, activation = 'relu'), BatchNormalization, Dropout(0.5) и Dense(1, activation =

Показатели производительности стратегий обучения базовых моделей и их тонкой настройки

Модель сети	Accuracy, tumor, %	Precision, tumor, %	Recall, tumor, %	f1-metric, tumor, %	AUC_macro, %
Xception	94,11	94,44	97,2	95,77	97,32
Xception fine-tuned	98	99,9	96,03	98	98,92
ResNet50	77,3	64,7	68	71,35	74
VGG-16	91,42	95,2	91,4	93,3	95,6
VGG-16 fine-tuned	93,14	97,44	92,26	94,34	96,12
2D-CNN	82,37	83,2	81,4	84,1	85,8
MobileNetV2	81,23	76,66	77,54	83,68	87,42

= 'sigmoid'). В качестве оптимизатора был использован Adam с параметром learning rate = 0,0001, метриками точности accuracy, precision, recall, AUC, number epochs = 100.

В результате применения построенной модели для классификации МРТ-снимков головного мозга были получены следующие результаты: accuracy = 93,14%, precision = 97,44%, recall = 92,26%, AUC = 96,12%. Точность классификации изображений из класса «Tumor» составила 91%, точность классификации МРТ-снимков из класса «No Tumor» составила 92%. Они превосходят аналогичные для этой же модели, но обученной по базовой стратегии переноса обучения.

Сравнительный анализ показателей точности исследуемых глубоких моделей и стратегий переноса обучения в задаче классификации МРТ-снимков головного мозга показал, что модель Xception в целом превосходит модель VGG-16 по всем показателям точности. Кроме того, модель Xception менее затратна по объему занимаемой памяти и требует меньше времени для обучения.

5 Заключение

В работе исследована эффективность методов переноса обучения глубоких нейронных сетей и их тонкая настройка в контексте анализа медицинских изображений в качестве альтернативы обучению глубоких сверточных нейронных сетей с нуля. Анализ проводился на наборах МРТ-снимков, содержащих изображения опухолей головного мозга человека («Tumor»), и изображения головного мозга здорового человека («No Tumor»). В качестве базовых моделей стратегий переноса обучения были использованы такие популярные глубокие нейронные сети, как Xception, VGG-16, ResNet50 и MobileNetV2.

Как показали результаты компьютерных экспериментов по классификации МРТ-снимков головного мозга с использованием предложенных стратегий, модели Xception и VGG-16 продемонстрировали превосходство над всеми глубокими моделями, обученными по базовой стратегии переноса обучения, а также глубокой сверточной нейронной сетью, обученной с нуля. Если на этапе применения базовой стратегии трансферного обучения показатели точности классификации МРТ-снимков глубокими моделями были сопоставимы, то на этапе применения стратегии тонкой настройки они существенно превзошли их. В целом можно сделать вывод о том, что предложенные стратегии обучения глубоких моделей позволяют получать более точные результаты

классификации исследуемой задачи классификации по сравнению с обучением глубоких моделей с нуля.

Таким образом, основываясь на результатах проведенных численных экспериментов и полученных оценках производительности моделей глубокого обучения, можно заключить, что методы тонкой настройки и переноса обучения на глубоких нейронных сетях более эффективны для обнаружения опухолей головного мозга по его МРТ-снимкам, осуществляя его значительно лучше, чем обученные с нуля сверточные нейронные сети, и превосходя их при ограниченных возможностях на увеличение размеров данных.

Литература

1. Louis D. N., Ohgaki H., Wiestler O. D., Cavenee W. K., Burger P. C., Jouvet A., Scheithauer B. W., Kleihues P. The 2007 WHO classification of tumours of the Central Nervous System // *Acta Neuropathol.*, 2007. Vol. 114. No. 2. P. 97–109.
2. Bakas S., Akbari H., Sotiras A., Bilello M., Rozycki M., Kirby J. S., Freymann J. B., Farahani K., Davatzikos C. Advancing the cancer genome atlas glioma MRI collections with expert segmentation labels and radiomic features // *Scientific Data*, 2017. Vol. 4. Art. 170117. 13 p.
3. Gillies R. J., Kinahan P. E., Hricak H. Radiomics: Images are more than pictures, they are data // *Radiology*, 2015. Vol. 278. P. 563–577.
4. Learning to learn / Eds. Th. Sebastian, L. Pratt. — Berlin: Springer Science and Business Media, 2012. 354 p.
5. Shin H.-C., Roth H. R., Gao M., Lu L., Xu Z., Nogues I., Yao J., Mollura D., Summers R. M. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning // *IEEE T. Med. Imaging*, 2016. Vol. 35. No. 5. P. 1285–1298.
6. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks // *Adv. Neur. In.*, 2012. Vol. 25. P. 1097–1105.
7. Liang H., Fu W., Yi F. A survey of recent advances in transfer learning // 19th Conference (International) on Communication Technology. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019. P. 1516–1523.
8. Chakrabarty N. Brain MRI images for brain Tumor detection // Kaggle, 2019. <https://www.kaggle.com/navoneel/brain-mri-images-for-brain-tumor-detection>.
9. Щетинин Е. Ю., Севастьянов Л. А. О методах повышения точности в многоклассовой классификации на несбалансированных данных // *Информатика и её применения*, 2020. Т. 14. Вып. 1. С. 63–70.
10. Shorten C., Khoshgofaar T. M. A survey on image data augmentation for deep learning // *J. Big Data*, 2019. Vol. 6. No. 1. P. 1–48.

11. *Simonyan K., Zisserman A.* Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arXiv.org, 4 Sep 2014. arXiv:1409.1556 [cs.CV].
12. *He K., Zhang X., Ren Sh., Sun J.* Deep residual learning for image recognition // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016. P. 770–778.
13. *Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna Z.* Re-thinking the inception architecture for computer vision // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016. P. 2818–2826.
14. *Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L.-C.* MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks // arXiv.org, 2019. 14 p. arXiv:1801.04381 [cs.CV].
15. *Шолле Ф.* Глубокое обучение на Python / Пер. с англ. — СПб.: Питер, 2018. 400 с. (*Chollet F.* Deep learning with Python. — New York, NY, USA: Manning, 2017. 384 p.)

Поступила в редакцию 12.09.2021

ON TRANSFER LEARNING METHODS IN BIOMEDICAL IMAGES CLASSIFICATION TASKS

E. Yu. Shchetinin¹ and L. A. Sevastianov^{2,3}

¹Financial University under the Government of the Russian Federation, 49 Leningradsky Prospekt, Moscow 125993, Russian Federation

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

³Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie Str., Dubna, Moscow Region 141980, Russian Federation

Abstract: Computer studies of the effectiveness of deep transfer learning methods for solving the problem of human brain tumors recognition based on magnetic resonance imaging (MRI) are carried out. Various strategies of transfer learning and fine-tuning of the models are proposed and implemented. Deep convolutional networks VGG-16, ResNet-50, Xception, and MobileNetV2 were used as the baseline models, pre-trained on ImageNet. Also, a deep convolutional neural network 2D-CNN was built and trained from scratch. Computer analysis of their performance metrics showed that when using the strategy of fine-tuning models on augmented MRI-scans data set, Xception model demonstrated higher accuracy values compared to other deep learning models. For Xception model, the accuracy of classification of MRI-scans with brain tumors was 96%, precision 99.43%, recall 96.03%, f1-score 97.7%, and AUC 98.92%.

Keywords: MRI scans; brain tumor; deep learning transfer; convolutional neural networks

DOI: 10.14357/19922264210408

Acknowledgments

The paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

References

1. Louis, D. N., H. Ohgaki, O. D. Wiestler, W. K. Cavenee, P. C. Burger, A. Jouvet, B. W. Scheithauer, and P. Kleihues. 2007. The 2007 WHO classification of tumours of the Central Nervous System. *Acta Neuropathol.* 114(2):97–109.
2. Bakas, S., H. Akbari, A. Sotiras, M. Bilello, M. Rozycki, J. S. Kirby, J. B. Freymann, K. Farahani, and C. Davatzikos. 2017. Advancing the cancer genome atlas glioma MRI collections with expert segmentation labels and radiomic features. *Scientific Data* 4:170117. 13 p.
3. Gillies, R. J., P. E. Kinahan, and H. Hricak. 2015. Radiomics: Images are more than pictures, they are data. *Radiology* 278:563–577.
4. Sebastian, Th., and L. Pratt, eds. 2012. *Learning to learn*. Berlin: Springer Science and Business Media. 354 p.
5. Shin, H.-C., H. R. Roth, M. Gao, L. Lu, Z. Xu, I. Nogues, J. Yao, D. Mollura, and R. M. Summers. 2016. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning. *IEEE T. Med. Imaging* 35(5):1285–1298.
6. Krizhevsky, A., I. Sutskever, and G. E. Hinton. 2012. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Adv. Neur. In.* 25:1097–1105.
7. Liang, H., W. Fu, and F. Yi. 2019. A survey of recent advances in transfer learning. *19th Conference (International) on Communication Technology Proceedings*. IEEE. 1516–1523.
8. Chakrabarty, N. 2019. Brain MRI images for brain tumor detection. Available at: <https://www.kaggle.com/>

- navoneel/brain-mri-images-for-brain-tumor-detection (accessed November 9, 2021).
9. Sevastyanov, L. A., and E. Yu. Shchetinin. 2020. O metodakh povysheniya tochnosti v mnogoklassovoy klassifikatsii na nesbalansirovannykh dannykh [On methods of improving the accuracy of multiclass classification on unbalanced data]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 14(1):63–70.
 10. Shorten, C., and T. M. Khoshgoftaar. 2019. A survey on image data augmentation for deep learning. *J. Big Data* 6(1):1–48.
 11. Simonyan, K., and A. Zisserman. 2014. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv.org. 14 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (accessed November 9, 2021).
 12. He, K., X. Zhang, Sh. Ren, and J. Sun. 2016. Deep residual learning for image recognition. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings*. IEEE. 770–778.
 13. Szegedy, C., V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna. 2016. Rethinking the inception architecture for computer vision. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings*. IEEE. 2818–2826.
 14. Sandler, M., A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, and L.-C. Chen. 2019. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. arXiv.org. 14 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/1801.04381> (accessed November 9, 2021).
 15. Chollet, F. 2017. *Deep learning with Python*. New York, NY: Manning. 384 p.

Received September 12, 2021

Contributors

Shchetinin Eugene Yu. (b. 1962) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Department of Mathematics, Financial University under the Government of the Russian Federation, 49 Leningradsky Prosp., Moscow 125993, Russian Federation; riviera-molto@mail.ru

Sevastianov Leonid A. (b. 1949) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; professor, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie, Dubna, Moscow Region 141980, Russian Federation; leonid.sevast@gmail.com

БАЗИС РЕАЛИЗАЦИИ СБОЕУСТОЙЧИВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

И. А. Соколов¹, Ю. А. Степченков², Ю. Г. Дьяченко³, Ю. В. Рождественский⁴,
А. Н. Каменских⁵

Аннотация: Исследуется устойчивость самосинхронных (СС) и синхронных схем к логическим сбоям (ЛС), которые могут вызвать нарушения режима работы системы управления сложным техническим устройством. Предлагается использование сбоеустойчивого СС-кодирования, рассматривающего анти-спейсерное состояние как второе состояние спейсера, что позволяет повысить уровень сбоеустойчивости СС-схем. Количественные оценки в первом приближении показывают явное (в 2,0–4,7 раза) преимущество СС-схем в сравнении с синхронным аналогом по уровню сбоеустойчивости. Использование модифицированного С-элемента Маллера для реализации разряда регистра ступени конвейера увеличивает это преимущество до уровня 2,2–5,4 раза. Благодаря этому СС-схемы становятся предпочтительным базисом для реализации сбоеустойчивых электронных схем для систем управления сложными техническими устройствами.

Ключевые слова: синхронные схемы; самосинхронные схемы; логический сбой; сбоеустойчивость; конвейер; индикация завершения переключения; вероятностная оценка

DOI: 10.14357/19922264210409

1 Введение

Неблагоприятные факторы окружающей среды (ядерные частицы, радиация, электромагнитное излучение, шумы) вызывают сбои в работе интегральных микросхем. Количественные и качественные оценки характера сбоев показывают, что среди них преобладают кратковременные однократные логические сбои (soft errors) [1]. С точки зрения жизнеспособности микросхемы они менее опасны, чем отказы, поскольку приводят к временному изменению состояния логического элемента схемы.

Характеристики ЛС существенно зависят от типа источника сбоя и его мощности (энергии). Например, ЛС, вызванный высокоэнергичной ядерной частицей или космическими лучами, может длиться до нескольких наносекунд [2], в то время как длительность ЛС из-за помех на трассах межсоединений, как правило, не превышает десятков пикосекунд.

Современная микроэлектроника в основном реализует синхронный принцип обработки данных, базирующийся на глобальном синхросигнале. С повышением частоты синхронизации растет и вероятность того, что ЛС, даже кратковременный, запишется в регистр и станет критическим.

Альтернативой синхронным схемам выступают СС-схемы [3]. Они имеют ряд свойств, отличающих их от синхронных схем:

- избыточное кодирование данных. В комбинационных СС-схемах, как правило, используется парафазное кодирование информационных сигналов;
- двухфазную дисциплину функционирования: рабочая фаза, в которой схема формирует новое рабочее состояние, и спейсерная фаза, в которой каждый информационный сигнал схемы переключается в одно состояние, не входящее в множество разрешенных рабочих состояний;
- индикацию всех элементов схемы, подтверждающую завершение переключения схемы в текущую фазу.

Эти свойства обеспечивают маскирование большей части ЛС. Благодаря им, СС-схемы обладают большей устойчивостью к ЛС, чем их синхронные аналоги [4–6]. Предложенные в работах [4, 5] методы схмотехнического и топологического проектирования СС-схем дополнительно повышают устойчивость СС-схем к ЛС.

Известен ряд способов [7, 8] повышения сбоеустойчивости асинхронных схем. Однако в них не

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

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

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

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

⁵Пермский национальный исследовательский политехнический университет, antoshkinoinfo@yandex.ru

делается попыток количественного анализа естественного уровня стойкости синхронных и самосинхронных схем к ЛС.

В статье проводится анализ особенности появления и распространения ЛС в синхронных и самосинхронных схемах. Даются вероятностные оценки их устойчивости к ЛС, подтверждающие целесообразность использования СС-схем в качестве базиса для реализации сбоеустойчивых систем управления.

2 Типы логических сбоев

Типы ЛС зависят от используемого кодирования обрабатываемых данных. Синхронные схемы обычно используют избыточное двоичное кодирование. Логический сбой в них выражается в изменении значения сигнала на противоположное. Самосинхронные схемы всегда используют избыточное, чаще всего парафазное, кодирование [3] и строгое чередование спейсера и рабочих состояний.

В каждый момент времени парафазный сигнал пребывает в спейсере (нулевом, «00», или единичном, «11») или в одном из рабочих состояний («01» или «10»). Состояние, противоположное спейсеру данного парафазного сигнала, — антиспейсер — в корректно спроектированной СС-схеме может появиться только в результате ЛС. Типовая индикация СС-схемы воспринимает антиспейсер как рабочее состояние, что приводит к ошибке. Но индикация его как спейсера с помощью ячейки «неравнозначность» (XOR) существенно повышает устойчивость СС-схем к этому типу ЛС [4]. Таблица 1 демонстрирует сбоеустойчивое кодирование парафазного сигнала. Все возможные случаи однократного кратковременного ЛС в СС-схемах для парафазного сигнала с нулевым спейсером показаны в табл. 2.

Отметим, что не каждый ЛС в схеме становится критическим, т. е. приводит к искажению обрабатываемых данных. Он может замаскироваться значениями других сигналов в соответствии с выполняемой функцией или не успеть записаться в регистр. Оценим вероятность того, что наблюдаемый

Таблица 1 Сбоеустойчивое кодирование СС-схем

Парафазный сигнал		Состояние	Индикатор XOR
X	XB		
0	0	спейсер	0
0	1	бит «0»	1
1	0	бит «1»	1
1	1	спейсер	0

Таблица 2 Возможные ЛС

Состояние парафазного сигнала	До ЛС	После ЛС
1	00	01
2	00	10
3	00	11
4	01	00
5	01	11
6	01	10
7	10	00
8	10	11
9	10	01

в схеме кратковременный ЛС окажется критическим.

3 Методика расчета вероятности сбоя

Для оценки вероятности появления критического сбоя используем следующие предположения:

- (1) плотность потока событий, приводящих к появлению ЛС, одинакова по всей площади кристалла микросхемы;
- (2) разные исходы каждого рассматриваемого события равновероятны;
- (3) длительность ЛС превышает тактовый период в синхронной схеме или суммарную длительность рабочей и спейсерной фазы в СС-схеме.

Первое предположение означает, что вероятность ЛС в какой-то части схемы прямо пропорциональна площади, занимаемой этой частью на кристалле.

Второе предположение упрощает анализ состояний при возникновении сбоя. Здесь не учитываются некоторые факторы, влияющие на вероятность разных исходов. Например, вероятность маскирования сбоя в сигнале другими сигналами зависит от выполняемой функции. В каждом конкретном случае она будет иметь разное значение, но в первом приближении считаем ее равной 0,5.

Высокопроизводительные синхронные и самосинхронные схемы имеют конвейерную структуру. Отличие СС-конвейера от синхронного аналога состоит в отсутствии глобального сигнала синхронизации и наличии подсхемы управления взаимодействием соседних ступеней. Рисунок 1 иллюстрирует конвейер СС-схемы. Здесь Ask и Req — сигналы запрос-ответного взаимодействия ступеней СС-конвейера.

Каждая ступень СС-конвейера включает комбинационную часть (КЧ) и выходной регистр (ВР),

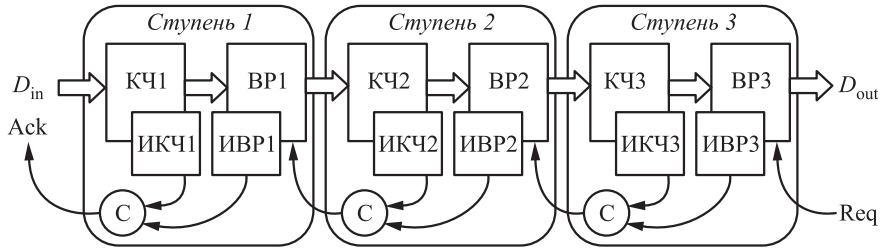


Рис. 1 Структура типового СС-конвейера

аналогично синхронному конвейеру, а также индикаторные подсхемы комбинационной части (ИКЧ) и регистра (ИВР). С-элементы Маллера [8] обеспечивают запрос-ответное взаимодействие соседних ступеней СС-конвейера на основе индикаторных выходов КЧ и ВР.

Устойчивость конвейера к кратковременным ЛС определяется устойчивостью его составных частей. Число однократных критических ЛС, наблюдаемых в КЧ ступени синхронного конвейера в течение времени T :

$$N_{CPS} = \lambda T A_{CPS} P_{CPS,1} P_{CPS,2},$$

где λ — плотность потока сбоев (число сбоев в единицу времени на единицу площади); A_{CPS} — площадь топологии КЧ; $P_{CPS,1}$ — вероятность того, что сбой не замаскируется и попадет на вход ВР ступени; $P_{CPS,2}$ — вероятность того, что сбой успеет записаться в ВР. Поскольку здесь предполагается равная вероятность исхода для каждого события и считается, что длительность сбоя превышает период тактового сигнала, $P_{CPS,1} = 0,5$ и $P_{CPS,2} = 1$. Тогда

$$N_{CPS} = 0,5 \lambda T A_{CPS}.$$

Аналогичное число однократных критических ЛС, наблюдаемых в ВР ступени синхронного конвейера:

$$N_{ORS} = \lambda T A_{ORS} P_{ORS,1} P_{ORS,2},$$

где A_{ORS} — площадь топологии ВР; $P_{ORS,1}$ — вероятность того, что сбой не замаскируется КЧ следующей ступени и попадет на вход ее ВР; $P_{ORS,2}$ — вероятность того, что сбой успеет записаться в ВР следующей ступени. В соответствии со сделанными предположениями $P_{ORS,1} = 0,5$ и $P_{ORS,2} = 1$. Тогда

$$N_{ORS} = 0,5 \lambda T A_{ORS}.$$

Поэтому число критических сбоев в одной ступени конвейера в течение времени T равна

$$N_S = 0,5 \lambda T (A_{CPS} + A_{ORS}).$$

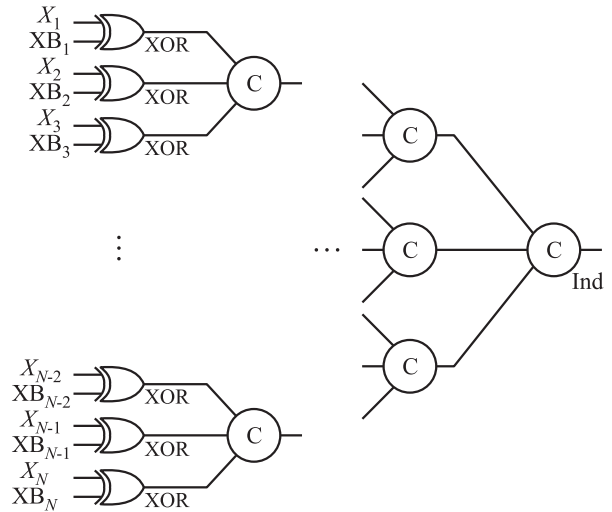


Рис. 2 Индикаторная подсхема

Аналогичным образом оценивается число критических ЛС из табл. 2 в ступени СС-конвейера в течение времени T .

Наименее чувствительными к ЛС оказываются ИКЧ и ИВР ступени конвейера. Индикаторная подсхема строится в виде пирамиды. Рисунок 2 иллюстрирует структуру индикаторной подсхемы для N парафазных сигналов. Ее нижний ярус реализуется на ячейках XOR. С-элементы на остальных ярусах пирамиды объединяют частичные индикаторные сигналы в один индикаторный выход.

С-элемент переключается в то состояние, в котором находятся все его входы одновременно [8]. В остальных случаях он хранит свое состояние. Однократный ЛС изменяет выход одного элемента в индикаторной пирамиде. Критическим такой ЛС может стать только в том случае, если он изменил состояние выхода С-элемента на вершине пирамиды. В прочих случаях он маскируется остальными элементами индикаторной подсхемы.

Анализ возможных случаев сбоя в СС-конвейере [4–6] позволяет получить следующие оценки числа однократных критических сбоев за время T :

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{СРСТ}} &= 0,1\lambda T A_{\text{СРСТ}}; \\ N_{\text{СIPST}} &= 0,25\lambda T P_{\text{СIP,О}} A_{\text{СIPST}}; \\ N_{\text{ОRST}} &= 0,24\lambda T A_{\text{ОRST}}; \\ N_{\text{RIPST}} &= 0,25\lambda T P_{\text{RIP,О}} A_{\text{RIPST}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $N_{\text{СРСТ}}$, $N_{\text{СIPST}}$, $N_{\text{ОRST}}$ и N_{RIPST} — числа критических ЛС на интервале времени T в КЧ, ИКЧ, ВР и ИВР соответственно; $A_{\text{СРСТ}}$, $A_{\text{СIPST}}$, $A_{\text{ОRST}}$ и A_{RIPST} — площади их топологической реализации; $P_{\text{СIP,О}}$ и $P_{\text{RIP,О}}$ — вероятности наблюдения сбоя, появившегося в индикаторной подсхеме, в ее выходном С-элементе для ИКЧ и ИВР соответственно.

Следующие рассуждения позволяют оценить значение вероятности $P_{\text{СIP,О}}$ и $P_{\text{RIP,О}}$. Индикаторная подсхема N парафазных сигналов в комбинационной СС-схеме включает N ячеек XOR и около $0,5N$ трехвходовых С-элементов. Площадь XOR примерно вдвое меньше площади С-элемента. Разряд регистра содержит два двухвходовых С-элемента и ячейку XOR в качестве индикатора [5]. Разрядность регистра ступени конвейера M в общем случае отличается от числа парафазных сигналов N в комбинационной части.

Тогда площади выходных С-элементов в ИКЧ ($A_{\text{СIP,О}}$) и ИВР ($A_{\text{RIP,О}}$) равны

$$A_{\text{СIP,О}} \approx \frac{A_{\text{СIPST}}}{4N}; \quad A_{\text{RIP,О}} \approx \frac{A_{\text{RIPST}}}{4M}$$

и вероятности наблюдения сбоя именно в них

$$P_{\text{СIP,О}} \approx \frac{1}{4N}; \quad P_{\text{RIP,О}} \approx \frac{1}{4M}. \quad (2)$$

Подставляя формулы (2) в (1), получаем оценки числа однократных критических ЛС в течение времени T в индикаторных подсхемах комбинационной части и регистра конвейера:

$$\begin{aligned} N_{\text{СIPST}} &= \frac{1}{16N} \lambda T A_{\text{СIPST}}; \\ N_{\text{RIPST}} &= \frac{1}{16M} \lambda T A_{\text{RIPST}}. \end{aligned}$$

Пусть площадь топологии ВР ступени синхронного конвейера в K раз меньше площади КЧ. Отношение площадей синхронной и самосинхронной схем соответствует отношению их аппаратных затрат. Аппаратная сложность комбинационных СС-схем вместе с индикаторной подсхемой в среднем в 2,7 раза больше, чем у синхронных аналогов. Регистр СС-конвейера сложнее своего синхронного аналога примерно в 1,5 раза.

Для практических величин M и N вероятностями $P_{\text{ТСIPST}}$ и $P_{\text{ТRIPST}}$ можно пренебречь. Тогда оценки суммарного числа однократных критических ЛС на интервале времени T в ступени синхронного (N_S) и самосинхронного конвейера (N_{ST}):

$$N_S \approx 0,5\lambda T(K+1)A_{\text{ОRS}}; \quad N_{\text{ST}} \approx 0,32\lambda T K A_{\text{ОRS}},$$

а их отношение:

$$K_P = \frac{N_S}{N_{\text{ST}}} \approx \frac{0,5(K+1)}{0,32K}.$$

При реальном значении K от 0,5 до 4 СС-конвейер в 2,0–4,7 раз более устойчив к ЛС, чем его синхронный аналог.

Наиболее чувствительной к ЛС частью цифровой схемы оказывается память, включая триггеры и регистры. В СС-регистре хранения на С-элементах [6] сбоеустойчивость может быть повышена путем обеспечения возможности восстановления корректного рабочего состояния в сбойном разряде регистра, хранящем антиспейсер, в рабочей фазе после окончания ЛС за счет незначительного усложнения схемы С-элемента (рис. 3) и разряда регистра на его основе (рис. 4) [5].

Тогда число однократных критических ЛС на интервале времени T в регистре ступени СС-конвейера

$$N_{\text{ORST}} = 0,15\lambda T A_{\text{ORST}}$$

и число однократных критических ЛС в ступени СС-конвейера уменьшается до

$$N_{\text{ST}} \approx 0,28\lambda T K A_{\text{ORS}},$$

а отношение K_P числа однократных критических ЛС в синхронной и самосинхронной схеме улучшается до 2,2–5,4.

Самым критичным узлом ступени СС-конвейера является индикаторный элемент, формирующий сигнал управления регистром предыдущей ступени (С-элементы на рис. 1). Его преждевременное переключение из-за ЛС способно вызвать «зависание» конвейера. Но его площадь пренебрежимо мала по сравнению с площадью остальных частей СС-конвейера. Поэтому его влиянием можно пренебречь. К тому же его реализация DICE-подобным [8] С-элементом с синфазными входами и выходами [5] позволяет кардинально решить проблему сбоеустойчивости за счет незначительного увеличения аппаратных затрат.

Таким образом, СС-конвейер, индицирующий антиспейсерное состояние как спейсер и использующий С-элементы, защищенные от «залипания»

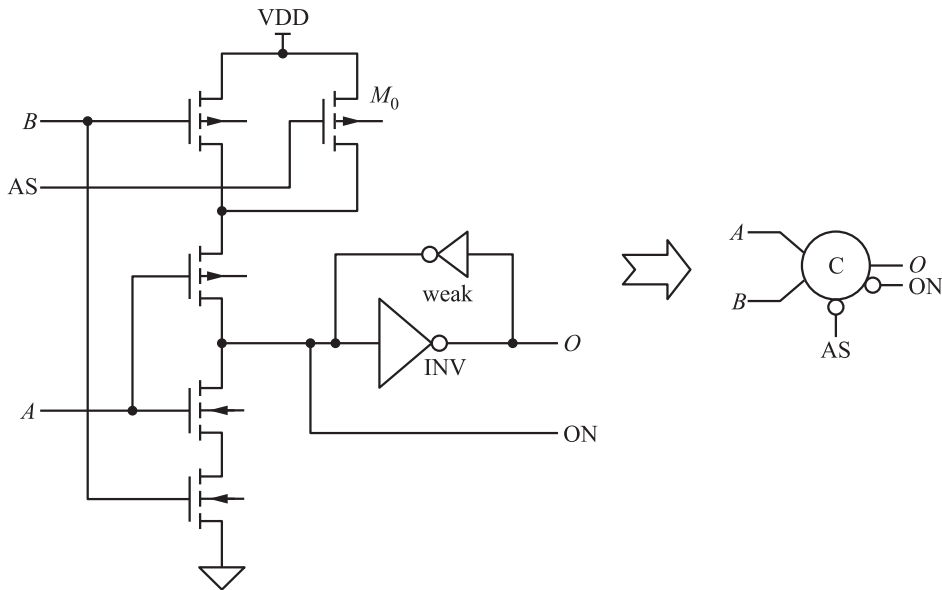


Рис. 3 Полустатический С-элемент, защищенный от «залипания» в антиспейсере

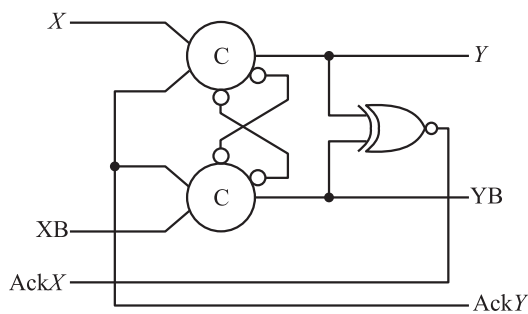


Рис. 4 Разряд регистра СС-конвейера, защищенный от «залипания» в антиспейсере

в антиспейсере, в разряде регистра ступени, обеспечивает в 2,2–5,4 раза большую устойчивость к кратковременным однократным сбоям, чем его синхронный аналог. Это предопределяет целесообразность использования СС-схем в качестве базиса для реализации сбоеустойчивых схем управления.

4 Заключение

Благодаря двухфазной дисциплине работы и избыточному кодированию сигналов СС-схемы маскируют многие типы ЛС и вследствие этого становятся предпочтительным базисом для реализации сбоеустойчивых систем управления.

Комбинационная часть, регистр и индикаторная подсхема ступени СС-конвейера в разной степени влияют на уровень сбоеустойчивости конвейера. Ступень СС-конвейера устойчива к 90% ЛС,

возникающих в ее комбинационной части и только к 76% ЛС в выходном регистре.

Индикация антиспейсерного состояния как спейсера и использование С-элемента, защищенного от «залипания» в антиспейсере, в разряде регистра ступени СС-конвейера обеспечивают сбоеустойчивость СС-конвейера в 2,2–5,4 раза выше уровня сбоеустойчивости синхронного конвейера.

Дальнейшая работа будет посвящена исследованию методов и средств обеспечения устойчивости СС-конвейера к другим типам сбоев и отказов.

Литература

1. Викторова В. С., Лубков Н. В., Степанянц А. С. Анализ надежности отказоустойчивых управляющих вычислительных систем. — М.: ИПУ РАН, 2016. 120 с.
2. Eaton P., Benedetto J., Mavis D., Avery K., Sibley M., Gadlage M., Turflinger T. Single event transient pulse width measurements using a variable temporal latch technique // IEEE T. Nucl. Sci., 2004. Vol. 51. No. 6. P. 3365–3368. doi: 10.1109/TNS.2004.840020.
3. Varshavsky V., Kishinevsky M., Marakhovsky V., et. al. Self-timed control of concurrent processes: The design of aperiodic logical circuits in computers and discrete systems. — Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publs., 1990. 245 p.
4. Stepchenkov Y. A., Kamenskih A. N., Diachenko Y. G., Rogdestvenski Y. V., Diachenko D. Y. Fault-tolerance of self-timed circuits // 10th Conference (International) on Dependable Systems, Services and Technologies. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019. P. 41–44. doi: 10.1109/DESSERT.2019.8770047.

5. Stepchenkov Y. A., Kamenskih A. N., Diachenko Y. G., Rogdestvenski Y. V., Diachenko D. Y. Improvement of the natural self-timed circuit tolerance to short-term soft errors // *Advances Science Technology Engineering Systems J.*, 2020. Vol. 5. No. 2. P. 44–56.
6. Stepchenkov Y., Rogdestvenski Y., Kamenskih A., Diachenko Y., Diachenko D. Improvement of the quasi delay-insensitive pipeline noise immunity // *11th Conference (International) on Dependable Systems, Services and Technologies*. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020. P. 47–51.
7. Monnet Y., Renaudin M., Leveugle R. Hardening techniques against transient faults for asynchronous circuits // *11th IEEE On-Line Testing Symposium (International)*. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005. P. 129–134. doi: 10.1109/IOLTS.2005.30.
8. Danilov I. A., Gorbunov M. S., Shnaider A. I., et al. On board electronic devices safety provided by DICE-based Muller C-elements // *Acta Astronaut.*, 2018. Vol. 150. P. 28–32.

Поступила в редакцию 19.09.21

THE ELECTRONIC COMPONENT BASE OF FAILURE RESILIENCE DIGITAL CIRCUITS

I. A. Sokolov¹, Yu. A. Stepchenkov¹, Yu. G. Diachenko¹, Yu. V. Rogdestvenski¹,
and A. N. Kamenskih²

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

²Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomol Prosp., Perm 614990, Russian Federation

Abstract: The article presents the research of self-timed and synchronous circuits in terms of resilience to soft errors which can cause disruptions in the control system’s operation of complex technical device. The use of a fail-resilient self-timed code is proposed, which considers the antispacer state as the second spacer state. This approach increases the self-timed circuit’s failure resilience level. In the first approximation, quantitative estimates show that the self-timed pipeline has a better failure resilience than the synchronous counterparts by 2.0–4.7 times. The use of modified C-element to implement the pipeline register bit increases this advantage to 2.2–5.4 times. Due to this, self-timed circuits are the preferred basis of failure resilient control systems implementation for complex technical equipment.

Keywords: synchronous circuits; self-timed circuits; soft error; failure resilience; pipeline; transition completion indication; probability evaluation

DOI: 10.14357/19922264210409

References

1. Viktorova, V. S., N. V. Lubkov, and A. S. Stepanyants. 2016. *Analiz nadezhnosti otkazoustoychivyykh upravlyayushchikh vychislitel’nykh sistem* [Fault-tolerant control computer systems’ reliability analysis]. Moscow: IPU RAN. 120 p.
2. Eaton, P., J. Benedetto, D. Mavis, K. Avery, M. Sibley, M. Gadlage, and T. Turflinger. 2004. Single event transient pulse width measurements using a variable temporal latch technique. *IEEE T. Nucl. Sci.* 51(6):3365–3368. doi: 10.1109/TNS.2004.840020.
3. Varshavsky, V., M. Kishinevsky, V. Marakhovsky, et al. 1990. *Self-timed control of concurrent processes: The design of aperiodic logical circuits in computers and discrete systems*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publs. 245 p.
4. Stepchenkov, Y. A., A. N. Kamenskih, Y. G. Diachenko, Y. V. Rogdestvenski, and D. Y. Diachenko. 2019. Fault-tolerance of self-timed circuits. *10th Conference (International) on Dependable Systems, Services, and Technologies Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 41–44. doi: 10.1109/DESSERT.2019.8770047.
5. Stepchenkov, Y. A., A. N. Kamenskih, Y. G. Diachenko, Y. V. Rogdestvenski, and D. Y. Diachenko. 2020. Improvement of the natural self-timed circuit tolerance to short-term soft errors. *Advances Science Technology Engineering Systems J.* 5(2):44–56.
6. Stepchenkov, Y., Y. Rogdestvenski, A. Kamenskih, Y. Diachenko, and D. Diachenko. 2020. Improvement of the quasi delay-insensitive pipeline noise immunity. *11th Conference (International) on Dependable Systems, Services, and Technologies Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 47–51.
7. Monnet, Y., M. Renaudin, and R. Leveugle. 2005. Hardening techniques against transient faults for asynchronous circuits. *11th International On-Line Testing Symposium Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 129–134. doi: 10.1109/IOLTS.2005.30.
8. Danilov, I. A., M. S. Gorbunov, A. I. Shnaider, et al. 2018. On board electronic devices safety provided by DICE-based Muller C-elements. *Acta Astronaut.* 150:28–32.

Received September 19, 2021

Contributors

Sokolov Igor A. (b. 1954) — Doctor of Science in technology, Academician of RAS, Director, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; isokolov@ipiran.ru

Stepchenkov Yuri A. (b. 1951) — 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; YStepchenkov@ipiran.ru

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

Rogdestvenski Yuri V. (b. 1952) — 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 119333, Russian Federation; YRogdest@ipiran.ru

Kamenskih Anton N. (b. 1991) — Candidate of Science (PhD) in technology, associated professor, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomol Prosp., Perm 614990, Russian Federation; antoshkinoinfo@yandex.ru

О ВЫБОРЕ ЧАСТИЧНЫХ ПОРЯДКОВ НА МНОЖЕСТВАХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ*

Е. В. Дюкова¹, Г. О. Масляков²

Аннотация: Рассматривается одна из центральных задач машинного обучения — задача классификации на основе прецедентов. Приводится описание схемы синтеза логических алгоритмов классификации в предположении, что признаковые описания прецедентов являются элементами декартова произведения конечных частичных порядков. В рамках данной схемы формулируется критерий корректности алгоритма голосования по представительным элементарным классификаторам классов. При условии, что исходные данные не упорядочены (описания прецедентов представляют собой элементы произведения антицепей), изучается возможность задания линейных порядков на множествах значений признаков, обеспечивающих более качественную классификацию, не обязательно корректную. Предлагается процедура «корректного» упорядочения допустимых значений отдельных признаков, при этом остальные признаки остаются антицепями. Приводятся результаты экспериментов на реальных данных, демонстрирующие эффективность разработанных в работе методов.

Ключевые слова: машинное обучение; логические алгоритмы классификации; корректный алгоритм классификации; частично упорядоченное множество; декартово произведение частичных порядков; линейный порядок; дуализация над произведением частичных порядков

DOI: 10.14357/19922264210410

1 Введение

В задаче классификации под прецедентной (обучающей) информацией понимается совокупность примеров изучаемых объектов, в которой каждый объект представлен в виде числового вектора, полученного на основе измерения или наблюдения ряда его параметров или характеристик, называемых признаками. Каждый пример (обучающий объект, или прецедент) приписан к определенному классу объектов. Требуется по признаковому описанию предъявленного объекта, о котором заранее не известно, какому классу он принадлежит, определить (распознать) этот класс.

Основное достоинство логического подхода к задаче классификации (распознавания) — возможность получения результата при отсутствии дополнительных предположений вероятностного характера и при небольшом числе прецедентов. Предполагается, что каждый признак принимает ограниченное число допустимых целочисленных значений. Анализ прецедентной информации сводится к поиску в исходных данных определенных закономерностей, или элементарных классификаторов, различающих объекты из разных классов. При этом большое внимание уделяется вопросам синтеза алгоритмов, безошибочно классифицирующих материал обучения. Такие алгоритмы на-

зываются корректными алгоритмами. Наиболее известны в данной области алгоритмы корректного голосования [1–4], предложенные впервые в отечественных работах, а также методы Logical Analysis of Data (LAD) и Formal Concept Analysis (FCA) [5]. Последние два направления логической классификации в основном нацелены на обработку (анализ) бинарных данных. основополагающие идеи LAD и FCA принадлежат соответственно П. Хаммеру (1986 г.) и Р. Вилле (1981 г.).

Стандартная постановка логической классификации не всегда позволяет решать прикладные задачи со сложными отношениями на множествах допустимых значений признаков. В [4, 6] на базе обобщения классических понятий логической классификации предложены корректные процедуры классификации при условии, что признаковые описания объектов представляют собой элементы декартова произведения конечных частично упорядоченных множеств, и рассмотрены вопросы применения асимптотически оптимальных алгоритмов перечисления элементарных классификаторов общего вида. Согласно предложенной общей постановке, в классическом случае признаки являются антицепями.

В [7] анонсирован быстрый метод независимого выбора линейных порядков на множествах

* Работа частично финансирована РФФИ (проект 19-01-00430).

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

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

допустимых значений признаков. Метод основан на предварительном анализе обучающей выборки и позволяет существенно повысить качество классификации, однако не гарантирует корректность классификации.

Основные результаты настоящей работы касаются исследования возможности построения частичных порядков на множествах допустимых значений признаков, обеспечивающих корректную классификацию обучающей выборки. Сформулирован критерий корректности логической классификации над произведением частичных порядков, согласно которому для корректности голосования по представительным элементарным классификаторам классов описание каждого прецедента из каждого класса должно быть независимым от множества описаний прецедентов из других классов. Показано, что задача эффективного упорядочения значений признаков без нарушения корректности алгоритма фактически сводится к труднорешаемой дискретной задаче поиска минимального покрытия булевой матрицы. Для сокращения временных затрат предложена и исследована процедура согласованного линейного упорядочения значений отдельных признаков, гарантирующая корректную классификацию только прецедентов одного класса.

2 Логический анализ данных с частичными порядками

Элементы x, y из частично упорядоченного множества P называются *сравнимыми*, если x предшествует y (запись $x \preceq y$ или $y \preceq x$). В противном случае x и y *несравнимые*. Для обозначения того, что элемент x предшествует элементу y и $y \neq x$, используется обозначение $x \prec y$. Частично упорядоченное множество P называется *цепью (антицепью)*, если все его элементы попарно сравнимы (несравнимые). Если множество P является цепью (антицепью), то частичный порядок \preceq называется *линейным (антилинейным) порядком*, а множество P *линейно (антилинейно) упорядоченным*. Если P представляет собой декартово произведение $P_1 \times \dots \times P_n$, где P_1, \dots, P_n — конечные частично упорядоченные множества, то элемент $x = (x_1, \dots, x_n) \in P$ *следует за* $y = (y_1, \dots, y_n) \in P$, если x_i *следует за* y_i при $i = 1, 2, \dots, n$.

Пусть $R \subset P$, R^+ — множество элементов, следующих за элементами из R . Элемент x множества $P \setminus R^+$ называется *независимым* от R элементом множества P . Элемент x множества $P \setminus R^+$ называется *максимальным независимым* от R элементом множества P , если для любого другого элемента y

множества $P \setminus R^+$ отношение $x \prec y$ не выполняется. Задача построения для заданного R множества максимальных независимых от R элементов множества P называется *дуализацией над произведением частичных порядков*.

Рассмотрим задачу логической классификации над произведением частичных порядков. Пусть M — исследуемое множество объектов с l попарно непересекающимися классами K_1, \dots, K_l , и пусть объекты множества M описываются признаками x_1, \dots, x_n . Предполагается, что $M = N_1 \times \dots \times N_n$, где $N_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$, — конечное множество допустимых значений признака x_i , на котором установлен частичный порядок. Не ограничивая общности, можно считать, что множество $N_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$, имеет наибольший элемент k_i . Задан конечный набор S_1, \dots, S_m объектов из множества M , о которых известно, каким классам они принадлежат. Это прецеденты, или обучающие объекты. Пусть их описания имеют вид $S_1 = (a_{11}, \dots, a_{1n}), S_2 = (a_{21}, \dots, a_{2n}), \dots, S_m = (a_{m1}, \dots, a_{mn})$, где a_{ij} — значение признака x_j для объекта S_i . Требуется по предъявленному набору значений признаков (a_1, \dots, a_n) , описывающему некоторый объект S из M , о котором, вообще говоря, неизвестно, какому классу он принадлежит, определить этот класс.

Обозначим соответственно через $R(K)$ и $R(\overline{K})$, $K \in \{K_1, \dots, K_l\}$, множество прецедентов класса K и множество прецедентов, не принадлежащих классу K . Будем говорить, что алгоритм A классифицирует объект из $R(K)$ *правильно*, если A относит этот объект к классу K . Алгоритм A называется *корректным на M* алгоритмом, если A правильно классифицирует каждый прецедент S_1, \dots, S_m .

Опишем схему работы рассматриваемого в настоящей работе корректного логического классификатора над произведением частичных порядков. Данная модель классификатора является обобщением классической модели голосования по представительным наборам [1, 2].

Пусть H — набор из r различных признаков вида $H = \{x_{j_1}, \dots, x_{j_r}\}$, $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_r)$, $\sigma_i \in N_{j_i}$, $i = 1, 2, \dots, r$. Пара (σ, H) называется *элементарным классификатором (эл. кл.) ранга r* . Близость объекта $S = (a_1, \dots, a_n)$ из M и эл. кл. (σ, H) , $H = \{x_{j_1}, \dots, x_{j_r}\}$, $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_r)$, будем оценивать величиной $\hat{B}(\sigma, S, H)$, равной 1, если $a_{j_i} \preceq \sigma_i$ при $i = 1, 2, \dots, r$, и равной 0 в противном случае. Будем говорить, что объект S содержит эл. кл. (σ, H) , если $\hat{B}(\sigma, S, H) = 1$. Эл. кл. (σ, H) , $H = \{x_{j_1}, \dots, x_{j_r}\}$, $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_r)$, порождает набор $S_{(\sigma, H)} = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$ из M , в котором $\gamma_{j_i} = \sigma_i$, $i = \{1, 2, \dots, r\}$, и $\gamma_t = k_t$ при $t \notin \{j_1, \dots, j_r\}$.

Эл. кл. (σ, H) называется *корректным для класса K* , если нельзя указать пару объектов S' и S'' таких, что $S' \in R(K)$, $S'' \in R(\overline{K})$ и $\hat{B}(\sigma, S', H) = \hat{B}(\sigma, S'', H) = 1$. Корректный для класса K эл. кл. (σ, H) называется *тупиковым*, если любой эл. кл. (σ', H') такой, что $S_{(\sigma, H)} \prec S_{(\sigma', H')}$, не является корректным для класса K . (Тупиковый) корректный эл. кл. называется *(тупиковым) представительным* для класса K , если хотя бы один прецедент из класса K содержит данный эл. кл.

Таким образом, если эл. кл. (σ, H) — представительный для класса K , то любой объект из $R(\overline{K})$ не содержит (σ, H) . Нетрудно также видеть, что если эл. кл. (σ, H) — (тупиковый) представительный для класса K и объект S' из $R(K)$ содержит (σ, H) , то $S_{(\sigma, H)}$ — (максимальный) независимый от $R(\overline{K})$ элемент множества M , который следует за S' .

Рассматриваемый классификатор A на этапе обучения строит для каждого класса K , $K \in \{K_1, \dots, K_l\}$, некоторое множество представительных эл. кл. $C^A(K)$. Далее осуществляется процедура вычисления оценок, или процедура голосования, которая заключается в следующем. На основе суммирования величин $\hat{B}(\sigma, S, H)$, $(\sigma, H) \in C^A(K)$, для каждого класса K , $K \in \{K_1, \dots, K_l\}$, вычисляется оценка $\Gamma(S, K)$ принадлежности распознаваемого объекта S классу K , которая либо равна нулю, либо больше нуля. Эта оценка имеет вид:

$$\Gamma(S, K) = \frac{1}{|C^A(K)|} \sum_{(\sigma, H) \in C^A(K)} P_{(\sigma, H)} \hat{B}(\sigma, S, H),$$

где $|C^A(K)|$ — мощность $C^A(K)$; $P_{(\sigma, H)}$ — вес эл. кл. (σ, H) . В качестве $P_{(\sigma, H)}$ обычно берется число объектов из $R(K)$, содержащих (σ, H) . Оценка $\Gamma(S, K)$ полагается равной нулю, если $C^A(K) = \emptyset$. Объект S относится к классу с максимальной положительной оценкой. Если классов с максимальной оценкой несколько, то происходит отказ от распознавания объекта S .

Пусть $Q(K, S')$, $S' \in R(K)$, — множество всех представительных эл. кл. из $C^A(K)$, которые объект S' содержит. Очевидно, алгоритм A классифицирует правильно объект S' из $R(K)$ тогда и только тогда, когда $Q(K, S') \neq \emptyset$.

Известно, что эл. кл. небольшого ранга, в частности тупиковые представительные эл. кл., наиболее информативны. Рассмотрим случай, когда $C^A(K)$ содержит множество всех тупиковых представительных эл. кл. класса K . В этом случае справедлива

Теорема 1. *Алгоритм A классифицирует правильно объект S' из $R(K)$ тогда и только тогда, когда S'*

является независимым от $R(\overline{K})$ элементом множества M .

Доказательство. *Необходимость.* Если алгоритм A классифицирует объект S' из $R(K)$ правильно, то $Q(K, S') \neq \emptyset$. Значит, объект S' содержит хотя бы один тупиковый представительный эл. кл. (σ, H) . Имеем $S' \preceq S_{(\sigma, H)}$, где $S_{(\sigma, H)}$ — максимальный независимый от $R(\overline{K})$ элемент множества M . Следовательно, S' — независимый от $R(\overline{K})$ элемент множества M .

Достаточность. Пусть $S' \in R(K)$ и S' — независимый от $R(\overline{K})$ элемент множества M . Рассмотрим эл. кл. (σ, H) такой, что $S' = S_{(\sigma, H)}$. Ни один объект S'' из $R(\overline{K})$ не содержит эл. кл. (σ, H) , иначе $S'' \preceq S'$ и, следовательно, S' не является независимым от $R(\overline{K})$ элементом множества M , что противоречит условию утверждения теоремы. Таким образом, S' содержит представительный эл. кл. (σ, H) класса K . Эл. кл. (σ, H) содержит хотя бы один тупиковый представительный эл. кл. класса K . Поэтому $Q(K, S') \neq \emptyset$. Теорема доказана.

Таким образом, если для любого K любой прецедент из $R(K)$ является независимым от $R(\overline{K})$ элементом множества M , то алгоритм, использующий в качестве $C^A(K)$ множество всех тупиковых эл. кл., корректный. Аналогичный результат имеет место, если в качестве $C^A(K)$ рассматривается множество всех представительных эл. кл. класса K .

Пусть $\tilde{M} = \tilde{N}_1 \times \dots \times \tilde{N}_n$. Здесь и далее $\tilde{M} = M$ и $x \preceq y$ в \tilde{M} , если $y \preceq x$ в M . Зададим отображение $\varphi: M \rightarrow M \times \tilde{M}$ следующим образом. Отображение φ переводит объект $S = (a_1, \dots, a_n)$ из M в объект $\varphi(S) = (a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_{2n})$ из $M \times \tilde{M}$, в котором $a_{n+i} = a_i$ при $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. Иными словами, признаковое описание объекта S дублируется с обратным отношением порядка.

Пусть $\varphi(M')$, $M' \subset M$, — образ M' при отображении φ . Имеет место

Теорема 2 [4]. *Если классы множества M не пересекаются, то любой прецедент из класса $\varphi(K)$ содержит представительный эл. кл. класса $\varphi(K)$.*

Таким образом, при любых частичных порядках N_1, \dots, N_n добавление признаков с обратными порядками делает корректной процедуру классификации по (тупиковым) представительным эл. кл. Однако увеличение числа признаков в 2 раза значительно увеличивает вычислительные затраты.

Отметим, что этап обучения — это самый сложный в вычислительном плане этап логической классификации. В [4] показано, что построение множества тупиковых представительных наборов класса K приводит к необходимости рассматривать задачу дуализации над произведением частичных порядков, которая относится к труднореша-

емым перечислительным задачам дискретной математики.

На практике порядки на множествах значений признаков могут быть не заданы или заданы «неудачно», демонстрируя не очень высокое качество классификации и не обеспечивая корректность классификации на обучающей выборке. Поэтому актуальны рассматриваемые ниже вопросы эффективного задания частичных порядков N_1, \dots, N_n .

3 Быстрая процедура независимого линейного упорядочения значений признаков

В данном разделе описана процедура выбора линейных порядков на множествах значений признаков, эффективная по времени вычислений и позволяющая повысить качество классификации, но не обеспечивающая корректность классификации.

Предлагаемая процедура основана на оценке информативности отдельных значений признаков по методу, идейно близкому к методике предвзвешенного анализа обучающей выборки, предложенной в [2]. Пусть $\mu_{ij}^{(1)}(a)$, $i \in \{1, 2, \dots, l\}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, $a \in N_j$, — доля прецедентов класса K_i , у которых признак x_j принимает значение a ; $\mu_{ij}^{(2)}(a)$, $i \in \{1, 2, \dots, l\}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, $a \in N_j$, — доля прецедентов не из класса K_i , у которых признак x_j принимает значение a . Величину $\mu_{ij}(a) = \mu_{ij}^{(1)}(a) - \mu_{ij}^{(2)}(a)$ назовем весом значения a признака x_j в классе K_i . Эта величина служит мерой близости значения a признака x_j классу K_i . Для каждого класса K_i , $i \in \{1, 2, \dots, l\}$, и для каждого признака x_j , $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, зададим следующий линейный порядок: $\forall y, z \in N_j$, $y \preceq z$ тогда и только тогда, когда $\mu_{ij}(y) \geq \mu_{ij}(z)$.

Рассмотрим $S' = (a_1, \dots, a_n) \in R(K_i)$, $i \in \{1, 2, \dots, l\}$. Предположим, что после задания порядка данный объект классифицирован неправильно. Тогда, согласно теореме 1, существует объект $S'' = (b_1, \dots, b_n) \in R(\overline{K}_l)$ такой, что $\mu_{ij}(a_j) \leq \mu_{ij}(b_j)$ при $j = 1, 2, \dots, n$. Следовательно, признаковые значения объекта S' недостаточно характерны для класса K_i , т.е. объект S' не является типичным для K_i . Таким образом, задание порядка описанным способом делает модель голосования по представительным эл. кл. менее чувствительной к выбросам. Очевидный недостаток процедуры заключается в том, что порядок на множестве значений каждого признака выбирается независимо от выбора порядков для других признаков.

4 Процедура корректного упорядочения значений признаков

Пусть для любого класса K , $K \in \{K_1, \dots, K_l\}$, множество $C^A(K)$ содержит все тупиковые представительные эл. кл. класса K . Частичный порядок на M назовем (A, K) -корректным, если алгоритм A правильно классифицирует каждый объект из $R(K)$. Согласно теореме 1, частичный порядок на M является (A, K) -корректным тогда и только тогда, когда для любого объекта S' , $S' \in R(K)$, и любого объекта S'' , $S'' \in R(\overline{K})$, либо S' и S'' несравнимые, либо $S' \prec S''$ (запись $S'' \not\prec S'$).

Построим булеву матрицу B_K . Каждой строке в матрице B_K соответствует пара объектов (S', S'') , где $S' \in R(K)$ и $S'' \in R(\overline{K})$, а каждому столбцу соответствует тройка (j, a, b) , где $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, $a, b \in N_j$, $a \neq b$. Элемент матрицы B_K , расположенный на пересечении строки (S', S'') и столбца (j, a, b) , равен 1, если значение признака x_j равно a и b у объектов S' и S'' соответственно. Набор столбцов H матрицы B_K назовем *покрытием*, если каждая строка матрицы B_K в пересечении хотя бы с одним из столбцов, входящих в H , дает 1 (каждая строка матрицы B_K *покрыта* хотя бы одним столбцом из H). Покрытие матрицы B_K называется *неприводимым*, если любое его собственное подмножество покрытием не является. Имеет место

Теорема 3. *Частичный порядок, заданный на множестве M , является (A, K) -корректным тогда и только тогда, когда существует неприводимое покрытие H матрицы B_K такое, что $\forall j \in \{1, 2, \dots, n\}$ и $\forall a, b \in N_j$, $a \prec b$, столбец (j, b, a) не входит в H .*

Доказательство. Необходимость. Предположим противное. Пусть существуют $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ и $a, b \in N_j$, $a \prec b$, такие, что столбец (j, b, a) входит во все неприводимые покрытия матрицы B_K . Тогда найдется строка (S', S'') матрицы B_K , которая покрыта столбцом (j, b, a) и не покрыта всеми остальными столбцами матрицы B_K . При этом из построения матрицы B_K следует, что объекты S' и S'' отличаются только признаком x_j и этот признак принимает значения b и a у объектов S' и S'' соответственно. Из условия $a \prec b$ следует $S'' \prec S'$, что противоречит (A, K) -корректности частичного порядка.

Достаточность. Рассмотрим неприводимое покрытие H матрицы B_K , удовлетворяющее условию теоремы. Тогда для любой строки (S', S'') матрицы B_K в H найдется столбец вида (j, a, b) , покрывающий строку (S', S'') . Это означает, что признак x_j

принимает значения a и b у объектов S' и S'' соответственно и $b \neq a$. Следовательно, $S'' \neq S'$. Отсюда в силу произвольности выбора объектов S' и S'' следует (A, K) -корректность частичного порядка. Теорема доказана.

Следствие 1. Произведение линейных порядков является (A, K) -корректным тогда и только тогда, когда существует неприводимое покрытие H матрицы B_K такое, что $a < b$ для любого столбца (j, b, a) из покрытия H .

Следствие 2. Произведение антилинейных порядков является (A, K) -корректным для любого класса K из $\{K_1, \dots, K_l\}$.

Основная проблема при построении (A, K) -корректного частичного порядка заключается в вычислительной сложности перечисления неприводимых покрытий булевой матрицы [7]. Для увеличения числа признаков с линейными порядками можно использовать приближенные методы поиска минимального покрытия.

При проведении экспериментов построение (A, K) -корректного частичного порядка осуществлялось с применением генетического алгоритма, ориентированного на приближенное решение задачи поиска минимального покрытия [8]. После завершения работы генетического алгоритма последовательно рассматривался каждый признак. С применением алгоритма Тарьяна [9] осуществлялось упорядочение ориентированного графа, вершинами которого служили значения из N_i , а каждому ребру (a, b) , $a, b \in N_i$, соответствовал столбец (j, a, b) (см. следствие 1 из теоремы 3). При этом обход вершин осуществлялся согласно порядку, определяемому процедурой быстрого линейного упорядочения из разд. 3. Если в результате применения алгоритма получался линейный порядок, это означало, что N_i — цепь. В противном случае N_i — антицепь.

Стоит отметить, что из-за сильной разреженности матрицы B_K применение жадного алгоритма для поиска минимального покрытия матрицы B_K оказалось менее эффективным.

5 Эксперименты

Эксперименты проводились на наборах данных из www.kaggle.com и archive.ics.uci.edu: Car (№ 1); Heart (№ 2); Dermatology (№ 3); Ph (№ 4); Soybean (№ 5). Для тестирования применялась методика трехкратного скользящего контроля. Качество классификации оценивалось по доле правильных ответов.

В таблице представлены результаты классификации алгоритмом голосования по тупиковым представительным эл. кл. для следующих случаев:

- (1) частичные порядки выбраны корректной процедурой;
- (2) для каждого N_i независимо выбран линейный порядок;
- (3) каждое множество N_i является антицепью (классический подход);
- (4) признаки линейно упорядочены экспертом и добавлены признаки с обратным порядком.

В таблице для каждого набора данных указано число объектов m , число признаков n , число классов l и максимальное число значений признака k .

Полученные результаты показывают, что время, затраченное на упорядочение значений признаков в каждой из двух предлагаемых процедур, существенно меньше времени обучения логического классификатора. Обе процедуры выбора линейных порядков улучшают качество классификации по сравнению с классическим подходом. При этом процедура независимого упорядочения показывает лучшее качество и тратит в несколько раз меньше времени, чем корректная процедура согласованного упорядочения. В обоих случаях суммарное время классификации значительно меньше времени классификации с использованием признаков с обратными порядками. Таким образом, более высокое качество классификации и меньшее время работы делает процедуру независимого выбора линейного порядка предпочтительней корректной процедуры.

Качество классификации алгоритма голосования по тупиковым представительным эл. кл. при различном выборе частичного порядка

№	(m, n, l, k)	(A, K) -корректный порядок	Независимый линейный порядок	Признаки антицепи	Признаки с обратными порядками
1	(1728, 4, 4, 4)	0,90	0,89	0,73	0,81
2	(302, 13, 2, 151)	0,85	0,89	0,76	0,91
3	(336, 34, 4, 75)	0,91	0,95	0,95	0,95
4	(427, 3, 15, 256)	—	0,69	0,43	0,61
5	(307, 35, 19, 8)	0,78	0,72	0,58	0,76

С другой стороны, подход с выбором корректного частичного порядка предоставляет больше информации для анализа классифицируемых данных. Из-за недостатка времени не удалось применить процедуру выбора корректного порядка к набору данных Ph.

6 Заключение

Авторами продолжены начатые в [4, 6, 7] исследования по разработке методов логического анализа за частично упорядоченных данных и применения этих методов в машинном обучении. Изучены вопросы повышения качества логической классификации путем задания на множествах значений признаков частичных порядков. Предложены и экспериментально исследованы различные способы выбора «хороших» линейных порядков. Показано, что предлагаемые методы упорядочения значений признаков позволяют улучшить качество классификации по сравнению с классическим подходом, когда отдельные значения признака сравниваются с использованием простого отношения равенства. Представленные результаты имеют приоритетный характер.

Литература

1. Баскакова Л. В., Журавлёв Ю. И. Модель распознающих алгоритмов с представительными наборами
2. Дюкова Е. В., Песков Н. В. Поиск информативных фрагментов описаний объектов в дискретных процедурах распознавания // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2002. Т. 42. № 5. С. 711–723.
3. Журавлёв Ю. И., Рязанов В. В., Сенько О. В. «Распознавание». Математические методы. Программная система. Практические применения. — М.: ФАЗИС, 2006. 176 с.
4. Дюкова Е. В., Масляков Г. О., Прокофьев П. А. О логическом анализе данных с частичными порядками в задаче классификации по прецедентам // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2019. Т. 59. № 9. С. 1605–1616.
5. Janostik R., Konecny J., Krajca P. Interface between Logical Analysis of Data and Formal Concept Analysis // Eur. J. Oper. Res., 2020. Vol. 284. Iss. 2. P. 792–800.
6. Дюкова Е. В., Масляков Г. О., Прокофьев П. А. Дуализация над произведением цепей: асимптотические оценки числа решений // Докл. Акад. наук, 2018. Т. 483. № 2. С. 130–133.
7. Бакланова А. О., Дюкова Е. В., Масляков Г. О. Исследование зависимости качества классификации от выбора частичных порядков на множествах значений признаков // Интеллектуализация обработки информации. — М.: Российская академия наук, 2020. С. 21–23.
8. Sotmezov R. M. Genetic algorithms for problems of logical data analysis in discrete optimization and image recognition // Pattern Recognit. Image Anal., 2009. Vol. 19. Iss. 3. P. 469–477.
9. Tarjan R. E. Edge-disjoint spanning trees and depth-first search // Acta Inform., 1976. Vol. 6. Iss. 2. P. 171–185.

Поступила в редакцию 15.01.21

ON THE CHOICE OF PARTIAL ORDERS ON FEATURE VALUES SETS IN THE SUPERVISED CLASSIFICATION PROBLEM

E. V. Djukova and G. O. Masliakov

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

Abstract: The authors consider one of the central problems of machine learning — the supervised classification. A scheme for the logical classification algorithms synthesis is described under the assumption that the features descriptions of precedents are the elements of the finite partial orders Cartesian product. A criterion for the correctness of the voting algorithm of representative elementary classifiers is formulated. The authors study the possibility of defining linear orders on sets of feature values that provide better classification, which is not necessarily correct, in assumption that the source data are not ordered (the precedents descriptions are the elements of the antichains product). A procedure is proposed for “correct” consistent ordering of the acceptable values of separate features, while the remaining features are antichains. The results of experiments on real data are presented demonstrating the effectiveness of the methods developed in the work.

Keywords: machine learning; logical classification algorithms; correct supervised classification algorithm; partially ordered set; Cartesian product of partial orders; linear order; dualization over product of partial orders

DOI: 10.14357/19922264210410

Acknowledgments

The reported study was funded by RFBR, project number 19-01-00430.

References

1. Baskakova, L., and Yu. Zhuravlev. 1981. A model of recognition algorithms with representative samples and systems of supporting sets. *USSR Comp. Math. Math. Phys.* 21(5):189–199.
2. Djukova, E., and N. Peskov. 2002. Search for informative fragments of object descriptions in discrete recognition procedures. *Comp. Math. Math. Phys.* 42(5):711–723.
3. Zhuravlev, Yu. I., Y. V. Ryazanov, and O. Y. Sen'ko. 2006. *Raspoznavanie. Matematicheskie metody. Programmnaya sistema. Primeneniya* [Recognition. Mathematical methods. Software system. Applications]. Moscow: FAZIS. 176 p.
4. Djukova, E., G. Maslyakov, and P. Prokofyev. 2019. On the logical analysis of partially ordered data in the supervised classification problem. *Comp. Math. Math. Phys.* 59(9):1542–1552.
5. Janostik, R., J. Konecny, and P. Krajča. 2020. Interface between logical analysis of data and formal concept analysis. *Eur. J. Oper. Res.* 284(2):792–800.
6. Djukova, E., G. Maslyakov, and P. Prokofjev. 2018. Dualization problem over the product of chains: Asymptotic estimates for the number of solutions. *Dokl. Math.* 98:564–567.
7. Baklanova, A., E. Djukova, and G. Masliakov. 2020. Investigation of the dependence of the supervised classification quality on the choice of partial orders on feature values sets. *Intelligent data processing: Theory and applications*. Moscow: Russian Academy of Sciences. 24–26.
8. Sotnezov, R. 2009. Genetic algorithms for problems of logical data analysis in discrete optimization and image recognition. *Pattern Recognit. Image Anal.* 19(3):469–477.
9. Tarjan, R. 1976. Edge-disjoint spanning trees and depth-first search. *Acta Inform.* 6(2):171–185.

Received January 15, 2021

Contributors

Djukova Elena V. (b. 1945) — 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; edjukova@mail.ru

Masliakov Gleb O. (b. 1996) — PhD student, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; gleb-mas@mail.ru

СТАТИСТИКА И КЛАСТЕРЫ В ПОИСКАХ АНОМАЛЬНЫХ ВКРАПЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ*

А. А. Грушо¹, Н. А. Грушо², М. И. Забейло³, Д. В. Смирнов⁴, Е. Е. Тимонина⁵,
С. Я. Шоргин⁶

Аннотация: Построены алгоритмы снижения уровня «ложных тревог» (ЛТ) при поиске аномалий в сложных гетерогенных последовательностях объектов (Big Data). Традиционно в математической статистике такое снижение достигается за счет минимизации ошибки ЛТ. Однако в задачах выявления аномалий (редкие вкрапления аномальных данных) такой подход ведет к повышению вероятности потери искомым аномалий. Чтобы не потерять искомые аномалии, в данной работе предлагается, наоборот, в критериях, рассчитанных на наименьшую сложность вычислений, допустить большую ошибку появления ЛТ, но использовать тот факт, что выделенных такими критериями объектов значительно меньше, чем исходных объектов в Big Data. Тогда выделенные объекты можно объединить в один кластер и использовать дополнительную информацию, связанную с объектами этого кластера, для выявления искомым аномалий. Смысл этих действий состоит в том, что более сложно вычисляемые характеристики объектов для отсева ЛТ не потребуют больших вычислительных ресурсов на меньшем относительно исходных данных кластере объектов. Показано, что при выполнении некоторых условий порядок использования дополнительной информации не влияет на результат ее использования при фильтрации ЛТ. Результаты применения алгоритма фильтрации в последовательности объектов обобщены на фильтрацию ЛТ в форме причинно-следственных схем в исходных данных. При известных схемах показано, как можно фильтровать ЛТ, выявляя только фрагменты схем.

Ключевые слова: информационная безопасность; поиск аномалий; алгоритмы фильтрации «ложных тревог»

DOI: 10.14357/19922264210411

1 Введение

В работе рассматривается задача поиска аномалий или небольших вкраплений нестандартных данных в гетерогенные пополняемые большие массивы информации (Big Data). Гетерогенность данных связана с множеством различных источников данных и множеством характеристик, которыми описываются свойства накопленной информации. Нестандартность данных часто связана с наличием признаков, по которым осуществляется поиск искомым аномалий. Приведем примеры таких задач.

В работах [1–3] исследуются задачи обнаружения вторжений в распределенные информационные системы (РИС). В этом случае нестандартность вкраплений в данные мониторинга заключается в появлении встречавшихся ранее признаков враждебных атак.

Поиск признаков враждебной деятельности инсайдеров РИС рассматривался в [4, 5]. Опыт сотрудников служб безопасности РИС позволяет выделять некоторые нестандартные особенности поведения инсайдеров в различных информационных базах данных, которые в своем объединении составляют гетерогенную информацию. Поскольку инсайдеров мало, то компрометирующие их фрагменты данных появляются редко — как небольшие вкрапления.

Неявные сбои компьютерных систем, которые проявляются через некоторое время в рабочих процессах, часто порождают в местах, связанных с первопричинами сбоев, слабовидимые аномалии [6, 7].

Мошеннические схемы в данных финансового мониторинга представляют собой небольшие вкрапления в информацию об обычных финансо-

* Работа частично поддержана РФФИ (проект 18-29-03081).

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, grusho@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

⁴ПАО Сбербанк России, dvlsmirnov@sberbank.ru

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

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

вых операциях, которые необходимо искать в гетерогенных Big Data [8].

Несмотря на различия в приложениях, в перечисленных примерах есть общие черты. Прежде всего, данные для поиска вкраплений редко представляют собой только числовые значения. Чаще всего анализируемые данные — это комплексные структуры значений (часто нечисловых) нескольких параметров. Такие данные будем называть объектами. Вместе с тем размеры каждого объекта, как правило, небольшие. В статистике такие объекты называются малыми выборками.

На примере множества малых выборок объясним проблемы, возникающие при поиске вкраплений [9, 10]. Если вкрапления не очевидны, а множество анализируемых объектов можно отнести к Big Data, то по соображениям вычислительной сложности в объектах выделяют просто вычисляемые характеристики и по ним строят критерий аномальности. Такой подход приводит к появлению большого числа выбранных объектов, которые обладают свойством вкрапления, но к таковым не относятся. Такие выбранные объекты называются «ложными тревогами». Чтобы сократить множество ЛТ, снижают границы отбора объектов, которые критерий считает тревогой. Тогда резко возрастает возможность потери истинных аномальных вкраплений. Математический анализ этой ситуации для малых выборок рассмотрен в работах [9, 10].

Чтобы не потерять искомые аномалии, в данной работе предлагается, наоборот, в критериях, рассчитанных на наименьшую сложность вычислений, допустить большую ошибку появления ЛТ, но использовать тот факт, что выделенных такими критериями объектов значительно меньше, чем исходных объектов в Big Data. Тогда выделенные объекты можно объединить в один кластер и использовать дополнительную информацию, связанную с объектами этого кластера, для выявления искомым аномалий. Смысл этих действий состоит в том, что более сложно вычисляемые характеристики объектов для отсева ЛТ не потребуют больших вычислительных ресурсов на меньшем относительно исходных данных кластере объектов. Отметим, что для различных объектов критерии могут отличаться, что дает возможность искать вкрапления в гетерогенных данных. Анализ гетерогенных данных с помощью различных методов анализа использовался в работах [4, 11]. Близкий подход к использованию дополнительных данных применялся в поиске схем мошенничества в работе [8].

В задаче обнаружения вторжений возможен аналогичный подход. В настоящее время вторжение, реализующее атаку, редко представляет собой одноразовое действие. Атаки строятся на основе ря-

да действий над объектами нечисловой природы, и чаще всего некоторые действия берутся из других известных атак. Такие ранее встречавшиеся действия могут быть найдены в библиотеках уязвимостей и проявляться в данных как вкрапления. Динамический поиск таких вкраплений позволяет своевременно включать дополнительные меры защиты, а затем, используя графы атак [12] как дополнительную информацию, последовательно избавляться от ЛТ, сокращая область воздействия атаки [2, 3, 13].

При поиске признаков инсайдеров дополнительная информация, сокращающая размеры кластеров объектов, в которых присутствуют нестандартные действия, может быть взята из баз данных различного рода поведенческой активности пользователей [14].

В качестве источников информации при локализации первопричин неявных сбоев могут использоваться дополнительные данные о причинно-следственных связях в схемах информационных технологий [6].

2 Построение вложенной системы кластеров

В задачах поиска нестандартных вкраплений данные можно представить строчкой объектов X_1, X_2, \dots, X_n , где каждый объект имеет сложную структуру, зависящую от значений параметров I_1, I_2, \dots, I_k . Сначала будем предполагать, что каждый объект выбирается независимо от других объектов в соответствии со своей логикой без учета логики, приводящей к выбору остальных объектов. Искомое вкрапление (аномалия) может быть описано с помощью нестандартных значений параметров по сравнению с другими объектами или с помощью другой логики выбора объекта, которые имеют некоторые отличительные особенности от других объектов. Поиск осуществляется с помощью критерия на наличие таких особенностей. Критерий представляет собой функцию от параметров рассматриваемого объекта, которая равна 1, если использованная в вычислении функции информация показала возможность наличия отличительных особенностей, присущих искомому вкраплению. В противном случае функция принимает значение 0. В результате работы критерия для каждого из объектов получается последовательность значений функции, состоящая из 0 и 1. При этом могут существовать объекты, не являющиеся вкраплениями, но обладающие характеристиками, на которых функция критерия принимает значе-

ние 1. На настоящем вкраплении функция критерия точно принимает значение 1.

В описании этой схемы не использовалось понятие вероятности, хотя из описания поиска вкрапления можно построить вероятностную схему, в которой объекты появляются случайно и независимо друг от друга. Тогда критерий определяется случайной величиной, принимающей значения 1 и 0. Распределение критерия на вкраплении отличается от распределения на остальных объектах. При этом в некоторых случаях критерий может ошибаться и принимать значение 1, хотя рассматриваемый объект получен в вероятностной схеме, не соответствующей вкраплению. На языке математической статистики такие случаи называются «ложными тревогами». Если данные можно рассматривать как одинаково распределенные объекты, то последовательность данных называется выборкой. В более общем случае данные являются неоднородными, что не меняет схему поиска вкраплений.

Если данных мало, а особенности, выделяющие вкрапления, встречаются редко, то первая единица в последовательности значений функции критерия с большей вероятностью служит признаком искомого вкрапления, чем ЛТ.

Если данных много, то появление ЛТ происходит с вероятностью, близкой к 1. Для отсева ЛТ необходима дополнительная информация. Легко показать, что такая дополнительная информация должна быть получена из других источников информации, независимых от использованных в функции критерия. В противном случае трудно или невозможно доказать, что решение является ЛТ. При этом иногда можно доказать противное: что принимаемое решение повторяет ЛТ исходного критерия.

Кроме того, дополнительная информация должна быть получена и использоваться независимо для каждой 1 в результатах применения уже использованного критерия. Эти дополнительные для каждой 1 данные формируют в исходных данных новую последовательность объектов $X_1^*, X_2^*, \dots, X_m^*$, где $m < n$. Новые данные образуют в исходных данных кластер, в котором заведомо находится искомое вкрапление. Для последовательности данных $X_1^*, X_2^*, \dots, X_m^*$ надо выбрать новый критерий, который не зависит от прежнего, но позволяет подтвердить или опровергнуть положительное решение, полученное после применения первого критерия.

В последовательности данных $X_1^*, X_2^*, \dots, X_m^*$ после применения второго критерия также надо искать ЛТ. Для этого необходимо искать новую дополнительную информацию, не зависящую от ис-

пользованной в первом и втором критериях. Повторяя алгоритм предыдущего шага, получим в исходных данных кластер меньшего размера, наверняка содержащий искомое вкрапление. В результате нескольких итераций возможны следующие результаты:

- кластер становится настолько малым, что шансы (вероятность) случайного появления ЛТ становятся малы, но искомое вкрапление в нем присутствует (это следует из исходных предположений);
- дополнительные данные исчерпаны;
- построенный алгоритм можно повторить;
- после последней итерации построено покрытие вкрапления в исходных данных, что достаточно для использования на практике.

3 Независимость решения от порядка использования критериев

Рассмотрим простейший пример вкрапления и его поиска. Пусть каждый объект зависит от трех параметров I_1, I_2 и I_3 . Предположим, что искомая аномалия характеризуется значимым отклонением значений каждого параметра. Сначала строим критерий поиска вкрапления по параметру I_1 . В результате получим кластер $K_{1.1}$.

Согласно алгоритму, построенному в предыдущем разделе, объекты, похожие на вкрапления, обрабатываются критерием, основанным на анализе независимых от I_1 значений параметра I_2 . В результате получаем кластер $K_{1.2}$. Возникает вопрос, будет ли зависеть следующий, третий, этап алгоритма от порядка использования критериев, основанных на анализе параметров I_1 и I_2 . т.е. сначала после применения критерия, основанного на данных о значениях параметра I_2 , получаем первый кластер $K_{2.1}$. К нему применяем алгоритм, основанный на значениях параметра I_1 , и получаем второй кластер $K_{2.2}$. Каждое положительное решение, полученное в результате обработки некоторого объекта X первым и вторым критериями, основано на использовании одной и той же информации. При этом в первом случае сначала для анализа X использована информация T_1 , породившая 1 первого уровня, а затем для анализа X использована информация T_2 , породившая 1 второго уровня. Во втором случае, наоборот, сначала использовалась информация T_2 , а затем использовалась информация T_1 . Как отмечалось в предыдущем разделе, дополнительная информация T_1 и T_2 должна быть

получена из различных, независимых от уже использованных в функциях критериев источников информации. Отсюда следует, что порядок применения T_1 и T_2 не влияет на обоснование положительного решения в результате второй итерации алгоритма анализа объекта X . Этот вывод можно сформулировать в форме следующего утверждения.

Теорема. Если данные T_1 и T_2 , используемые для анализа и обоснования вкрапления объекта X независимы друг от друга (независимые источники информации), то порядок их применения не влияет на получаемое значение 1 после итерации алгоритма.

Следствие 1. Независимо от порядка применения независимых данных T_1 и T_2 число единиц в последнем слое после повторной итерации применения алгоритма одно и то же.

Доказательство. Поскольку информация T_1 и T_2 применяется к X независимо друг от друга, то можно считать, что 1 в последнем слое (после двух итераций) получила двойное подтверждение. Если хотя бы один из критериев даст 0, то в силу независимости данный объект X будет отброшен, т. е. X не войдет в кластер после двух итераций. По предположению, вкрапление удовлетворяет всем критериям и, следовательно, оно остается после второй итерации. Тогда после второй итерации остаются те и только те объекты, которые на каждом критерии дают 1. Следствие 1 доказано.

Следствие 2. Если проведено k итераций алгоритма кластеризации и используемые на всех уровнях данные для критериев независимы друг от друга, то порядок их применения не влияет на получаемое значение 1 после всех итераций алгоритма.

Доказательство. По теореме и следствию 1 для любой 1 в результате k итераций алгоритма все критерии принимают значение 1. Тогда любая пара из них перестановочна. Из теории подстановок [15] следует, что любая подстановка может быть получена произведением транспозиций. Отсюда следует утверждение следствия 2.

Таким образом, результат кластеризации при условии независимости дополнительной информации не зависит от порядка использования информации при формировании результирующего кластера. В случае когда критерии носят вероятностный характер и статистически не зависят друг от друга, итерация алгоритма отсева ЛТ порождает множество независимых статистических данных на порожденном кластере объектов.

4 Выявление вкрапления схем

Предположим, что некоторые данные в строчке объектов X_1, X_2, \dots, X_n связаны причинно-следственными связями. Такие сочетания событий будем называть схемами. По логике причинно-следственных связей схемы могут быть представлены ориентированными ациклическими графами (DAG — Directed Acyclic Graph). Вершины таких DAG — это объекты из исходных данных, а дуги направлены от объектов, составляющих причины, к объектам-следствиям. Пусть объекты исходных данных X_1, X_2, \dots, X_n , не входящие в схемы, построены независимо друг от друга, как было описано ранее. Размер схемы — это число вершин в ней, он описывается параметром d , множество значений которого много меньше n . Признаки схемы — это фрагменты описывающего ее DAG.

Две схемы называются *эквивалентными*, если они отличаются именами вершин, т. е. объекты могут отличаться, но причинно-следственные связи между объектами соответствуют одной схеме. Эквивалентные схемы имеют изоморфные DAG. Кроме того, признаки эквивалентных схем также могут быть изоморфны. Если при этом часть значений параметров изоморфных признаков эквивалентных схем совпадает, то будем говорить о сходных признаках двух схем. При совпадении части признаков в эквивалентных схемах будем называть эти схемы подозрительными.

Рассмотрим задачу поиска вкраплений в виде эквивалентных схем. Поскольку эквивалентные схемы могут быть построены только при переборе подпоследовательностей исходных данных, то поиск в Big Data необходимо осуществлять по более простым изоморфным признакам. Упрощение алгоритма поиска может породить ЛТ. Таким образом, приходим к задаче анализа результатов поиска на предмет сокращения ЛТ.

Далее будем использовать логику поиска ЛТ из предыдущего раздела. Для этого будем использовать дополнительную информацию. В исходной схеме объекты, входящие в нее, априори не известны. Сначала предположим, что искомой схеме соответствует граф G , представленный в виде DAG с непомеченными объектами, но различающимися вершинами, который известен. Это означает, что известна система причинно-следственных связей, порождающих схему, т. е. известны все порождающие функции, по которым из значений некоторых определенных параметров исходных объектов (из разных вершин) следует значение или ограничение на параметр в объекте-следствии. На графе G это означает наличие ориентированных дуг к объекту-следствию.

Пусть α, β, \dots — подграфы G , $G^* = \{\alpha, \beta, \dots\}$. Тогда изоморфные признаки двух эквивалентных схем будут иметь изоморфные элементы из G^* . Одной частью дополнительной информации в рассматриваемом поиске является возможная повторяемость сходных признаков эквивалентных схем. Отметим, что множество эквивалентных схем в данных может состоять из двух и более экземпляров. «Ложные тревоги» могут состоять из элементов G^* . Работа по поиску эквивалентных схем в рассматриваемом случае распадается на два направления.

1.1 Прежде всего необходимо исследовать объекты, которые могут реализовать схему или ее часть с точки зрения хотя бы приближенного описания причинно-следственных связей, которые описываются в схеме. Эти данные содержатся в дополнительных данных, которые, в свою очередь, содержатся в описаниях параметров и их значений. Результатом этих исследований станут потенциальные фрагменты графов фрагментов схем с конкретными объектами вместо вершин графов, изоморфные элементам из G^* . Построенные логические связи должны вытекать из значений части параметров реальных объектов. На основании полученных результатов можем нанести на исходные данные выявленные элементы причин и следствий искомой схемы. Объекты, которые не попадают как потенциальные вершины графов, могут не рассматриваться. Тем самым происходит существенное сокращение рассматриваемых данных и сужается кластер объектов дальнейшего рассмотрения.

1.2 Используя результаты 1.1, можем выделить потенциальные фрагменты эквивалентных схем на рассматриваемом массиве данных.

1.3 Имея фрагменты и логические основания построения причинно-следственных связей, максимально достраиваем каждый фрагмент до графа, изоморфного графу G (это сложные алгоритмы, но данных меньше). Построенные схемы будут эквивалентными.

2.1 Второе направление связано с привязкой значений других, не задействованных в формировании дуг, параметров в объектах восстановленных графов или их фрагментов. Это направление связано с выявлением подозрительных схем. Например, речь может идти о дополнительной информации, связанной со свойствами субъектов, к которым относятся объекты. Будем считать, что эта дополнительная информация не зависит от информации, порождающей причинно-следственные связи.

Однако используем эту дополнительную информацию во всех выделенных в исходных данных эквивалентных схемах. Тогда подозрительные схемы будут состоять из эквивалентных схем, в которых дополнительная информация о субъектах частично совпадает.

2.2 Полученное множество подозрительных схем не может быть большим и вряд ли содержит ЛТ.

Поскольку можно разделять (считать независимой) дополнительную информацию о причинно-следственных связях и информацию о субъектности в объектах, то по теореме их можно переставлять, т.е. сначала выделять субъектные значения параметров объектов, а затем искать фрагменты схемы с заданными значениями субъектных характеристик. С точки зрения отсева ЛТ результаты будут совпадать.

Если информации о схеме нет, но есть возможность определить отдельные эквивалентные причинно-следственные связи, то их можно рассматривать в качестве простейших схем и, выделив их, попытаться избавиться от ЛТ на кластере меньшего размера данных. Далее, используя подозрительные простейшие графы, достраивать их до логически законченных схем. Отметим, что иногда схемы могут содержать меняющиеся компоненты.

Таким образом можно выявлять мошеннические схемы и их участников.

5 Заключение

В статье построены алгоритмы снижения уровня ЛТ в сложных гетерогенных последовательностях объектов (Big Data). Традиционно в математической статистике такое снижение достигается минимизацией ошибки ЛТ. Однако в задачах выявления вкраплений (аномалий) такой подход ведет к повышению вероятности потери искомого вкрапления [9, 10]. Для предотвращения такой потери предлагается использовать дополнительную вспомогательную информацию. Организация использования этой информации, предложенная в статье, позволяет снизить объем кластера исходных данных, содержащий искомые вкрапления в такой степени, чтобы использовать статистические оценки или логические методы, которые уже не порождают ЛТ с высокой вероятностью.

Показано, что при выполнении некоторых условий порядок использования дополнительной информации не влияет на результат ее использования при фильтрации ЛТ.

Результаты применения алгоритма фильтрации ЛТ в последовательности объектов обобщены на

фильтрацию ЛТ в форме причинно-следственных схем в исходных данных. При известных схемах показано, как можно фильтровать ЛТ, выявляя только фрагменты схем.

При фильтрации ЛТ в схемах и их фрагментах можно использовать различные виды дополнительной информации. При выполнении некоторых условий независимости в этом случае также можно менять порядок использования дополнительной информации.

Если рассматривать вкрапления как аномальную схему причинно-следственных связей объектов исходных данных, то при определенных условиях можно выявлять схемы мошенничества и их участников.

Литература

1. *Axelsson S.* Intrusion detection systems: A survey and taxonomy, 2000. <http://www.cse.msu.edu/~cse960/Papers/security/axelsson00intrusion.pdf>.
2. *Grusho A., Levykin M., Timonina E., Piskovski V., Timonina A.* Architecture of consecutive identification of attack to information resources // 7th Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015. P. 265–268. doi: 10.1109/ICUMT.2015.7382440.
3. *Грушо А. А., Забежайло М. И., Зацаринный А. А., Тимонина Е. Е.* О некоторых возможностях управления ресурсами при организации проактивного противодействия компьютерным атакам // Информатика и её применения, 2018. Т. 12. Вып. 1. С. 62–70.
4. *Грушо А. А., Забежайло М. И., Смирнов Д. В., Тимонина Е. Е.* Модель множества информационных пространств в задаче поиска инсайдера // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 4. С. 65–69.
5. *Грушо А. А., Забежайло М. И., Смирнов Д. В., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я.* Методы математической статистики в задаче поиска инсайдера // Информатика и её применения, 2020. Т. 14. Вып. 3. С. 71–75. doi: 10.14357/19922264200310.
6. *Грушо Н. А., Грушо А. А., Тимонина Е. Е.* Локализация сбоев с помощью метаданных // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы, 2020. № 3. С. 9–15.
7. *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.
8. *Vaughan G.* Efficient big data model selection with applications to fraud detection // Int. J. Forecasting, 2018. Vol. 36. Iss. 3. P. 1116–1127.
9. *Grusho A., Grusho N., Timonina E.* The bans in finite probability spaces and the problem of small samples // Distributed computer and communication networks / Eds. V. Vishnevskiy, K. Samouylov, D. Kozyrev. — Lecture notes in computer science ser. — Springer, 2019. Vol. 11965. P. 578–590. doi: 10.1007/978-3-030-36614-8_44.
10. *Axelsson S.* The base-rate fallacy and the difficulty of intrusion detection // ACM T. Inform. Syst. Se., 2000. Vol. 3. No. 3. P. 186–205.
11. *Grusho A., Grusho N., Timonina E.* Method of several information spaces for identification of anomalies // Intelligent distributed computing XIII / Eds. I. Kotenko, C. Badica, V. Desnitsky, D. El Baz, M. Ivanovic. — Studies in computational intelligence ser. — Springer, 2020. Vol. 868. P. 515–520. doi: 10.1007/978-3-030-32258-8_60.
12. *Barik M., Sengupta A., Mazumdar C.* Attack graph generation and analysis techniques // Defence Sci. J., 2016. Vol. 66. No. 6. P. 559–567. doi: 10.14429/dsj.66.10795.
13. *Grusho A., Grusho N., Timonina E.* Detection of anomalies in non-numerical data // 8th Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016. P. 273–276. doi: 10.1109/ICUMT.2016.7765370.
14. *Смирнов Д. В., Грушо А. А., Забежайло М. И., Тимонина Е. Е.* Система сбора и анализа информации из различных источников в условиях Big Data // Int. J. Open Information Technologies, 2021. Vol. 9. No. 4. P. 64–71.
15. *Wielandt H.* Finite permutation groups. — New York / London: Academic Press, 1964. 114 p.

Поступила в редакцию 17.09.21

STATISTICS AND CLUSTERS FOR DETECTION OF ANOMALOUS INSERTIONS IN BIG DATA ENVIRONMENT

A. A. Grusho¹, N. A. Grusho¹, M. I. Zabezhailo¹, D. V. Smirnov², E. E. Timonina¹, and S. Ya. Shorgin¹

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 paper builds algorithms for reducing the level of “false alarms” when searching for anomalies in complex heterogeneous sequences of objects (Big Data). Traditionally, in mathematical statistics, such a decrease is achieved by minimizing the error of “false alarms.” However, in the problems of detecting anomalies (rare intrusions of anomalous data), this approach leads to an increase in the probability of losing the required anomalies. In this paper, in order not to lose the required anomalies, on the contrary, in criteria designed for the least complexity of calculations, it is proposed to make a large error of the appearance of “false alarms” but use the fact that the number of objects allocated by such criteria is much smaller than the number of original objects in Big Data. The selected objects can then be grouped into a single cluster and additional information related to the objects in the cluster can be used to identify the required anomalies. The sense of these actions is that more difficult-to-compute characteristics of objects for dropping out “false alarms” will not require large computational resources on a smaller cluster of objects relative to the original data. It is shown that when certain conditions are satisfied, the order of using additional information does not affect the result of its use when filtering “false alarms.” The results of the filtering algorithm in the sequence of objects are generalized to filtering “false alarms” in the form of causal schemes in the initial data. Known schemes show how “false alarms” can be filtered identifying only fragments of schemes.

Keywords: information security; search for anomalies; algorithms for filtering “false alarms”

DOI: 10.14357/19922264210411

Acknowledgments

The paper was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-29-03081).

References

1. Axelsson, S. 2002. Intrusion detection systems: A survey and taxonomy. Available at: <http://www.cse.msu.edu/~cse960/Papers/security/axelsson00intrusion.pdf> (accessed November 15, 2021).
2. Grusho, A., M. Levykin, E. Timonina, V. Piskovski, and A. Timonina. 2015. Architecture of consecutive identification of attack to information resources. *7th Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 265–268. doi: 10.1109/ICUMT.2015.7382440.
3. Grusho, A. A., M. I. Zabezhailo, A. A. Zatsarinny, and E. E. Timonina. 2018. O nekotorykh vozmozhnostyakh upravleniya resursami pri organizatsii proaktivnogo protivodeystviya komp'yuternym atakam [On some possibilities of resource management for organizing active counteraction to computer attacks]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 12(1):62–70.
4. Grusho, A. A., M. I. Zabezhailo, D. V. Smirnov, and E. E. Timonina. 2017. Model' mnozhestva informatsionnykh prostranstv v zadache poiska insaydera [The model of the set of information spaces in the problem of insider detection]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(4):65–69.
5. Grusho, A. A., M. I. Zabezhailo, D. V. Smirnov, E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin. 2020. Metody matematicheskoy statistiki v zadache poiska insaydera [Mathematical statistics in task of identifying hostile insiders]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 14(3):71–75. doi: 10.14357/19922264200310.
6. Grusho, N. A., A. A. Grusho, and E. E. Timonina. 2020. Lokalizatsiya sboev s pomoshch'yu metadannykh [Localizing failures with metadata]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of Information Security. Computer Systems] 3:9–15.
7. 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.
8. Vaughan, G. 2018. Efficient big data model selection with applications to fraud detection. *Int. J. Forecasting* 36(3):1116–1127.
9. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2019. The bans in finite probability spaces and the problem of

- small samples. *Distributed computer and communication networks*. Eds. V. M. Vishnevskiy, K. E. Samouylov, and D. V. Kozyrev. Lecture notes in computer science ser. Springer. 11965:578–590. doi: 10.1007/978-3-030-36614-8_44.
10. Axelsson, S. 2000. The base-rate fallacy and its implications for the difficulty of intrusion detection. *ACM T. Inform. Syst. Se.* 3(3):186–205.
 11. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2020. Method of several information spaces for identification of anomalies. *Intelligent distributed computing XIII*. Eds. I. Kotenko, C. Badica, V. Desnitsky, D. El Baz, and M. Ivanovic. Studies in computational intelligence ser. Springer. 868:515–520. doi: 10.1007/978-3-030-32258-8_60.
 12. Barik, M., A. Sengupta, and C. Mazumdar. 2016. Attack graph generation and analysis techniques. *Defence Sci. J.* 66(6):559–567. doi: 10.14429/dsj.66.10795.
 13. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2016. Detection of anomalies in non-numerical data. *8th Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 273–276. doi: 10.1109/ICUMT.2016.7765370.
 14. Smirnov, D. V., A. A. Grusho, M. I. Zabezhailo, and E. E. Timonina. 2021. System for collecting and analyzing information from various sources in Big Data conditions. *Int. J. Open Information Technologies* 9(4):64–71.
 15. Wielandt, H. 1964. *Finite permutation groups*. New York / London: Academic Press. 114 p.

Received September 17, 2021

Contributors

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

Grusho Nikolai A. (b. 1982) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Institute of Informatics Problems, 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, A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; m.zabezhailo@yandex.ru

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

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

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

МОДЕЛЬ СХЕМЫ ПРИОРИТЕТНОГО ДОСТУПА ТРАФИКА URLLC И eMBB В СЕТИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ В ВИДЕ РЕСУРСНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ*

И. А. Кочеткова¹, А. И. Кушазли², П. А. Харин³, С. Я. Шоргин⁴

Аннотация: Сверхнадежная передача данных с малой задержкой (URLLC, ultrareliable and low-latency communication) и усовершенствованная подвижная широкополосная связь (eMBB, enhanced mobile broadband) стали ключевыми сценариями реализации сетей пятого поколения (5G, fifth generation). В работе формализована модель ресурса сети 5G в виде тройки — полоса пропускания радиочастот, продолжительность слота времени и максимально возможная мощность передаваемого сигнала. Для схемы занятия ресурса, предполагающей адаптивное изменение мощности сигнала и равномерное распределение слота времени между устройствами, приведено условное распределение вероятностей приема запроса на передачу трафика. Модель с приоритетным доступом URLLC и прерыванием обслуживания eMBB с учетом указанной схемы занятия ресурса построена в виде ресурсной системы массового обслуживания (РСМО).

Ключевые слова: 5G; URLLC; eMBB; приоритетный доступ; прерывание обслуживания; ресурсная система массового обслуживания

DOI: 10.14357/19922264210412

1 Введение

Беспроводные сети пятого поколения содержат крупномасштабные системы межмашинной связи (massive machine-type communication, mMTC), сверхнадежную передачу данных с малой задержкой и усовершенствованную подвижную широкополосную связь. Например, в [1–3] рассматриваются подходы к совместному обслуживанию URLLC и eMBB. Для учета случайного расположения устройств в сети применяется стохастическая геометрия [4]. Если же учитывать не только модель движения пользователей, но и их активность обращения к тем или иным услугам, то удобным аппаратом являются РСМО [5, 6]. Ресурсные системы массового обслуживания находят применения в различных областях, например при анализе совместного использования радиочастот [7, 8].

Данная работа продолжает исследования, представленные в [9–11]. В [9] рассмотрена модель совместного обслуживания URLLC и eMBB с приостановкой обслуживания eMBB, а в [10] рассмотрена модель с изменением скорости передачи сессии eMBB до ее прерывания.

Статья организована следующим образом. В разд. 2 описаны характеристики соты, требо-

вания к ресурсу и показаны существующие планировщики для распределения радиоресурсов. Далее, в разд. 3, детально описана процедура приоритетного доступа узкополосного трафика URLLC и функционирования системы в целом. В разд. 4 выведены вероятностно-временные характеристики для предложенной модели.

2 Модель ресурса

В сетях скорость передачи данных зависит от таких параметров, как частота, мощность и время. Рассмотрим соту сети беспроводной передачи данных, в которой устройства распределены равномерно, при этом радиус передачи данных равен R , так что $0 < d < R$, где d — расстояние от пользователя до базовой станции. Предполагается, что ресурс имеет трехмерную структуру и задается как $Y = [0, \hat{F}] \times [0, \hat{T} = 1] \times [0, \hat{P}]$, где, в свою очередь, \hat{F} — полоса пропускания частот; \hat{T} — временная единица, описывающая доступную полосу пропускания частот и нормированная к 1, т. е. $\hat{T} = 1$; \hat{P} — максимально возможная мощность передаваемого сигнала. Для планирования распределения ресурсов существует множество схем, к примеру, таких

* Публикация создана при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-37-70079).

¹ Российский университет дружбы народов; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, gudkova-ia@rudn.ru

² Российский университет дружбы народов, aikushch@yandex.ru

³ Российский университет дружбы народов, pxarin@mail.ru

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

как Full-Power (FP) и Round Robin (RR). Разница между ними в том, что для FF все устройства всегда работают на максимальной мощности, а временной ресурс распределяется соответственно достижимой каждым устройством скорости. А для RR временной ресурс делится на равные части между всеми устройствами пользователей, которые для обеспечения гарантированной минимальной скорости сами регулируют мощность передачи данных.

Требование к ресурсу для передачи потокового трафика можно выразить вектором $\mathbf{y} = (y_f, y_t, y_p)$. Тогда скорость передачи b можно представить в виде системы трансцендентных уравнений

$$b = y_f y_t \log_2 \left(1 + \frac{y_p \text{PL}}{N_0} \right);$$

$$A_j(y_t, y_t, y_p) = 0, \quad j = 1, \dots, J,$$

где PL — коэффициент затухания сигнала; N_0 — коэффициент мощности шума; $A_j(y_f, y_t, y_p)$ — некоторая функция. Политика занятия ресурса основана на его разделении по частоте и времени, т. е. при условии n сессий потокового трафика множество возможных конфигураций занятия ресурса имеет вид:

$$\mathbf{Y}(n) = \left\{ (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n) : \right. \\ \left. 0 < y_f^i \leq \hat{F}, 0 < y_t^i \leq 1, 0 < y_p^i \leq \hat{F}, \right. \\ \left. \sum_{i=1}^n y_f^i \leq \hat{F}, \sum_{i=1}^n y_t^i \leq 1, y_p^i \leq \hat{F}, i = 1, \dots, n \right\}, \\ n > 0,$$

а значит, при случайном затухании сигнала PL вероятность приема запроса на передачу потокового трафика при условии, что уже установлено n сессий, определяется по формулам

$$p_0 = P \{ (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n, \mathbf{y}_{n+1}) \in \mathbf{Y}(1) \}; \\ p_n = \frac{P \{ (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n, \mathbf{y}_{n+1}) \in \mathbf{Y}(n+1) \}}{P \{ (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n) \in \mathbf{Y}(n) \}}, \quad n > 0,$$

где $P \{ (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n) \in \mathbf{Y}(n) \}$ рассчитывается по политике занятия ресурса с учетом функциональной зависимости между компонентами требования к ресурсу $\mathbf{y} = (y_f, y_t, y_p)$.

В работе описывается политика управления радиоресурсами RR. Как упоминалось ранее, в этом алгоритме временной ресурс делится поровну между всеми имеющимися пользователями. Однако в то же время мощность передачи регулируется индивидуально в зависимости от требований. Получается, что если реализована политика адаптивного изменения мощности без деления по частоте, т. е.

требование $\mathbf{y} = (y_f, y_t, y_p)$ к ресурсу и множество $\mathbf{Y}_{\text{RR}}(n)$ возможных конфигураций занятия ресурса имеют вид:

$$\mathbf{y}(n) = \left(y_f = \hat{F}, y_t = \frac{1}{n}, \right. \\ \left. y_p = N_0 \left(2^{bn/\hat{F}} - 1 \right) \text{PL}^{-1} \right); \\ \mathbf{Y}_{\text{RR}}(n) = \left\{ (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n) : \mathbf{y}_i = \left(\hat{F}, \frac{1}{n}, y_p^i \right), \right. \\ \left. 0 < y_p^i \leq \hat{F}, i = 1, \dots, n \right\}, \quad n \geq 0,$$

то вероятность приема новой сессии потокового трафика при условии, что уже установлено n сессий, вычисляется по формулам

$$p_0 = 1 - F_{\text{PL}} \left(N_0 \left[2^{b/\hat{F}} - 1 \right] \hat{F}^{-1} \right); \\ p_n = \frac{\left\{ 1 - F_{\text{PL}} \left(N_0 \left[2^{b(n+1)/\hat{F}} - 1 \right] \hat{F}^{-1} \right) \right\}^{n+1}}{\left\{ 1 - F_{\text{PL}} \left(N_0 \left[2^{bn/\hat{F}} - 1 \right] \hat{F}^{-1} \right) \right\}^n}, \\ n > 0,$$

где $F_{\text{PL}}(x)$ — функция распределения коэффициента затухания сигнала.

Предположим, что устройства распределены равномерно по кругу R , тогда функция распределения $F_d(x) = P \{ \xi_d \leq x \} = x^2/R^2$, а плотность распределения равна $f_d(x) = 2x/R^2$. Случайная величина затухания сигнала $\xi_{\text{PL}} = A\xi_d^B$, где A и B — константы. Тогда появляется возможность выразить $F_{\text{PL}}(x)$ через $F_d(x)$ по формуле:

$$F_{\text{PL}} = P \{ \xi_{\text{PL}} \leq x \} = P \left\{ \xi_d \leq \left(\frac{x}{A} \right)^{-B} \right\} = \\ = F_d \left(\frac{x}{A} \right)^{-B} = \left(\frac{x}{A} \right)^{-2B}.$$

Вероятность приема вычисляется по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} p_0 &= 1 - \frac{\left(N_0 \left[2^{b/\hat{F}} - 1 \right] \hat{F} \right)^{-2B}}{(AR)^2}; \\ p_n &= \frac{\left\{ 1 - N_0 \left[2^{b(n+1)/\hat{F}} - 1 \right] \hat{F}^{-1}/(AR) \right\}^{2(n+1)}}{\left\{ 1 - N_0 \left[2^{bn/\hat{F}} - 1 \right] \hat{F}^{-1}/(AR) \right\}^{2n}}, \end{aligned} \right\} (1) \\ n > 0.$$

3 Модель схемы приоритетного доступа

Перейдем к построению математической модели для узкополосного и широкополосного трафика в виде системы массового обслуживания с приоритетным обслуживанием узкополосного трафика — прерыванием скорости передачи широкополосного трафика. Предположим, что входящие потоки запросов на передачу узкополосного и широкополосного трафика пуассоновские с интенсивностями λ_u и λ_m соответственно, а среднее время передачи распределено по экспоненциальному закону с параметрами μ_u и μ_m . Отметим тот факт, что каждая сессия узкополосного трафика занимает одну ресурсную единицу, а широкополосного — один ресурсный блок (PRB, physical resource block), состоящий из b ресурсных единиц. В таком случае максимальное число сессий URLLC равно $C = bN$, где N — максимальное число eMBB-сессий, такое что $N = \lfloor C/b \rfloor$.

Узкополосный трафик имеет приоритет, который реализуется за счет прерывания активных сессий широкополосного eMBB-трафика. Далее представлено описание функционирования системы для разных вариантов развития событий. При поступлении запроса на передачу широкополосного трафика eMBB возможны следующие варианты.

1. Если свободного ресурса для обеспечения скорости передачи широкополосного трафика достаточно, то запрос на обслуживание широкополосного трафика будет принят.
2. Если свободного ресурса для обеспечения скорости передачи широкополосного трафика недостаточно, тогда запрос будет заблокирован.

После поступления запроса на передачу узкополосного трафика URLLC возможны следующие варианты.

1. Если свободного ресурса для обеспечения скорости передачи узкополосного трафика достаточно, то запрос будет принят и передача трафика будет начата.
2. Если свободного ресурса для обеспечения скорости передачи узкополосного трафика недостаточно, но обслуживается хотя бы одна сессия широкополосного трафика, то запрос будет принят за счет прерывания обслуживания случайно выбранной сессии широкополосного трафика и передача трафика будет начата.
3. Если свободного ресурса для обеспечения скорости передачи узкополосного трафика недостаточно, а сессии широкополосного трафика отсутствуют, то запрос будет заблокирован.

При завершении передачи узкополосного трафика URLLC и широкополосного трафика eMBB сессия будет завершена, и выделенный для нее ресурс будет освобожден в обоих случаях.

Опишем функционирование системы при помощи случайного процесса $\mathbf{X}(t)$ с состояниями вида $\mathbf{x} = (n_m, n_u)$, где n_m — число обслуживаемых сессий широкополосного трафика; n_u — число обслуживаемых сессий узкополосного трафика. Тогда пространство состояний $\mathbf{X}(t)$ будет иметь вид:

$$\mathbf{X} = \{(n_m, n_u) : n_m \geq 0, n_u \geq 0, bn_m + n_u \leq C\}.$$

В этом случае возможные переходы для произвольного состояния $\pi(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, имеют вид:

$$a(n_m, n_u)(n_m + 1, n_u) = p_m(n_m + n_u)\lambda_m, \\ bn_m + n_u + b \leq C;$$

$$a(n_m, n_u)(n_m, n_u + 1) = p_u(n_m + n_u)\lambda_u, \\ bn_m + n_u + 1 \leq C;$$

$$a(n_m, n_u)(n_m - 1, n_u + 1) = p_u(n_m + n_u)\lambda_u, \\ bn_m + n_u + 1 > C, n_m \geq 0;$$

$$a(n_m, n_u)(n_m - 1, n_u) = n_m\mu_m, n_m > 0;$$

$$a(n_m, n_u)(n_m + 1, n_u) = n_u\mu_u, n_u > 0,$$

где $p_m(\cdot)$ вычисляется по формулам (1), а $p_u(\cdot)$ также вычисляется по формулам (1), но уже при $b = 1$.

Исходя из описанных правил, записывается матрица интенсивностей переходов, и могут быть найдены стационарные вероятности $\pi(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$.

4 Вероятностные характеристики

После нахождения стационарных вероятностей $\pi(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, могут быть вычислены следующие показатели эффективности:

- среднее число сессий широкополосного трафика eMBB

$$\bar{n}_m = \sum_{n_m=1}^N n_m \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} \pi(n_m, n_u);$$

- среднее число сессий узкополосного трафика URLLC

$$\bar{n}_u = \sum_{n_u=1}^C n_u \sum_{n_m=0}^{\lfloor (C-n_u)/b \rfloor} \pi(n_m, n_u);$$

- вероятность блокировки (англ. blocking probability) широкополосного трафика eMBB

$$B_m = \sum_{n_u=0}^C \pi \left(\left\lfloor \frac{C-n_u}{b} \right\rfloor, n_u \right);$$

- вероятность блокировки узкополосного трафика URLLC

$$B_u = \pi(0, C);$$

- вероятность прерывания (англ. interruption probability) обслуживания широкополосного трафика eMBB

$$I = \sum_{n_m=1}^{N-1} \pi(n_m, C - bn_m) \times \\ \times \frac{p_u(n_m + n_u)\lambda_u}{p_u(n_m + n_u)\lambda_u + n_m\mu_m + n_u\mu_u} \frac{1}{n_m} + \\ + \pi(N, C - bN) \frac{p_u(n_m + n_u)\lambda_u}{p_u(n_m + n_u)\lambda_u + n_m\mu_m} \frac{1}{n_m}.$$

5 Заключение

Разработана математическая модель для узкополосного URLLC- и широкополосного eMBB-трафика в виде РСМО с приоритетным обслуживанием узкополосного трафика — прерыванием скорости передачи. Предложены показатели эффективности приоритетного доступа — среднее число сессий, вероятность блокировки и вероятность прерывания обслуживания.

Литература

1. Alsenwi M., Tran N. H., Bennis M., Pandey S. R., Bairaigi A. K., Hong C. S. Intelligent resource slicing for eMBB and URLLC coexistence in 5G and beyond: A deep reinforcement learning based approach // IEEE T. Wirel. Commun., 2021. Vol. 20. Iss. 7. P. 4585–4600. doi: 10.1109/TWC.2021.3060514.
2. Zhang W., Derakhshani M., Lambotaran S. Stochastic optimization of URLLC–eMBB joint scheduling with queuing mechanism // IEEE Wirel. Commun. Lett., 2021. Vol. 10. Iss. 4. P. 844–848. doi: 10.1109/LWC.2020.3046628.
3. Yin H., Zhang L., Roy S. Multiplexing URLLC traffic within eMBB services in 5G NR: Fair scheduling // IEEE T. Commun., 2021. Vol. 69. Iss. 2. P. 1080–1093. doi: 10.1109/TCOMM.2020.3035582.
4. Hmamouche Y., Benjillali M., Saoudi S., Yanikomeroglu H., Renzo M. D. New trends in stochastic geometry for wireless networks: A tutorial and survey // P. IEEE, 2021. Vol. 109. Iss. 7. P. 1200–1252. doi: 10.1109/JPROC.2021.3061778.
5. Petrov V., Solomitckii D., Samuylov A., Lema M. A., Gapeyenko M., Moltchanov D., Andreev S., Naumov V., Samouylov K., Dohler M., Koucheryavy Y. Dynamic multi-connectivity performance in ultra-dense urban mmWave deployments // IEEE J. Sel. Area. Comm., 2017. Vol. 35. Iss. 9. P. 2038–2055. doi: 10.1109/JSAC.2017.2720482.
6. Naumov V., Samouylov K. Product-form Markovian queueing systems with multiple resources // Probab. Eng. Inform. Sc., 2021. Vol. 35. Iss. 1. P. 180–188. doi: 10.1017/S026996481900024X.
7. Markova E., Gudkova I., Ometov A., Dzantiev I., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Flexible spectrum management in a smart city within licensed shared access framework // IEEE Access, 2017. Vol. 5. P. 22252–22261. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2758840.
8. Маркова Е. В., Гольская А. А., Дзантиев И. Л., Гудкова И. А., Шоргин С. Я. Сравнительный анализ показателей эффективности модели беспроводной сети межмашинного взаимодействия, работающей в рамках двух политик разделения радиоресурсов // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 1. С. 108–116. doi: 10.14357/19922264190115.
9. Харин П. А., Макеева Е. Д., Кочеткова И. А., Ефросинин Д. В., Шоргин С. Я. Система массового обслуживания с орбитами для анализа совместного обслуживания трафика с малыми задержками URLLC и широкополосного доступа eMBB в беспроводных сетях пятого поколения // Информатика и её применения, 2020. Т. 14. Вып. 4. С. 17–24. doi: 10.14357/19922264200403.
10. Kushchazli A., Ageeva A., Kochetkova I., Kharin P., Chursin A., Shorgin S. Model of radio admission control for URLLC and adaptive bit rate eMBB in 5G network // CEUR Workshop Procee., 2021. Vol. 2946. P. 74–84.
11. 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.

Поступила в редакцию 21.10.21

MODEL FOR ANALYZING PRIORITY ADMISSION CONTROL OF URLLC AND eMBB COMMUNICATIONS IN 5G NETWORKS AS A RESOURCE QUEUING SYSTEM

I. A. Kochetkova^{1,2}, A. I. Kushchazli¹, P. A. Kharin¹, and S. Ya. Shorgin²

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

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

Abstract: Ultrareliable and low-latency communication (URLLC) data transmission and enhanced mobile broadband (eMBB) are critical scenarios for the fifth generation (5G) networks. A 5G network resource model was formalized using a triple — radio frequency bandwidth, time slot duration, and the maximum possible power of the transmitted signal. For the scheme of resource occupation which assumes an adaptive change in the signal power and uniform distribution of the time slot between devices, the authors show a conditional distribution of the probabilities of receiving a request for traffic transmission. The model with priority access URLLC and interruption of eMBB service, considering the specified model of resource occupation, is built in the form of a resource queuing system.

Keywords: 5G; URLLC; eMBB; priority admission control; interruption; resource queuing system

DOI: 10.14357/19922264210412

Acknowledgments

The paper was supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program. The reported study was funded by RFBR, project number 20-37-70079.

References

- Alsenwi, M., N. H. Tran, M. Bennis, S. R. Pandey, A. K. Bairagi, and C. S. Hong. 2021. Intelligent resource slicing for eMBB and URLLC coexistence in 5G and beyond: A deep reinforcement learning based approach. *IEEE T. Wirel. Commun.* 20(7):4585–4600. doi: 10.1109/TWC.2021.3060514.
- Zhang, W., M. Derakhshani, and S. Lambotharan. 2021. Stochastic optimization of URLLC-eMBB joint scheduling with queuing mechanism. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 10(4):844–848. doi: 10.1109/LWC.2020.3046628.
- Yin, H., L. Zhang, and S. Roy. 2021. Multiplexing URLLC traffic within eMBB services in 5G NR: Fair scheduling. *IEEE T. Commun.* 69(2):1080–1093. doi: 10.1109/TCOMM.2020.3035582.
- Hmamouche, Y., M. Benjillali, S. Saoudi, H. Yanikomeroglu, and M. D. Renzo. 2021. New trends in stochastic geometry for wireless networks: A tutorial and survey. *P. IEEE* 109(7):1200–1252. doi: 10.1109/JPROC.2021.3061778.
- Petrov, V., D. Solomitckii, A. Samuylov, M. A. Lema, M. Gapeyenko, D. Moltchanov, S. Andreev, V. Naumov, K. Samouylov, M. Dohler, and Y. Koucheryavy. 2017. Dynamic multi-connectivity performance in ultra-dense urban mmWave deployments. *IEEE J. Sel. Area. Comm.* 35(9):2038–2055. doi: 10.1109/JSAC.2017.2720482.
- Naumov, V., and K. Samouylov. 2021. Product-form Markovian queueing systems with multiple resources. *Probab. Eng. Inform. Sc.* 35(1):180–188. doi: 10.1017/S026996481900024X.
- Markova, E., I. Gudkova, A. Ometov, I. Dzantiev, S. Andreev, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov. 2017. Flexible spectrum management in a smart city within licensed shared access framework. *IEEE Access* 5:22252–22261. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2758840.
- Markova, E. V., A. A. Golskaia, I. L. Dzantiev, I. A. Gudkova, and S. Ya. Shorgin. 2019. Sravnitel'nyy analiz pokazateley effektivnosti modeli besprovodnoy seti mezhmashinnogo vzaimodeystviya, rabotayushchey v ramkakh dvukh politik razdeleniya radioresursov [Comparative analysis of performance measures for a wireless machine-to-machine network model operating within two radio resource management policies]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(1):108–116. doi: 10.14357/19922264190115.
- Kharin, P. A., E. D. Makeeva, I. A. Kochetkova, D. V. Efrosinin, and S. Ya. Shorgin. 2020. Sistema massovogo obsluzhivaniya s orbitami dlya analiza sovместnogo obsluzhivaniya trafika s malymi zaderzhkami URLLC i shirokopolosnogo dostupa eMBB v besprovodnykh setyakh pyatogo pokoleniya [Retrial queuing model for analyzing joint URLLC and eMBB transmission in 5G networks]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 14(4):17–24. doi: 10.14357/19922264200403.
- Kushchazli, A., A. Ageeva, I. Kochetkova, P. Kharin, A. Chursin, and S. Shorgin. 2021. Model of radio admission control for URLLC and adaptive bit rate eMBB in 5G network. *CEUR Workshop Procee.* 2946:74–84.

11. Kochetkova, I. A., A. I. Kushchazli, P. A. Kharin, and S. Ya. Shorgin. 2021. Model' dlya analiza prioritetnogo dostupa trafika URLLC pri preryvanii obsluzhivaniya i snizhenii skorosti peredachi sessiy eMBB v seti 5G [Model for analyzing priority URLLC transmission with eMBB bit rate degradation and interruptions in 5G networks]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(3):123–134.

Received October 21, 2021

Contributors

Kochetkova Irina A. (b. 1985) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; gudkova-ia@rudn.ru

Kushchazli Anna I. (b. 1997) — PhD student, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; aikushch@yandex.ru

Kharin Petr A. (b. 1993) — PhD student, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; pxarin@mail.ru

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕСОВОГО ОБЛИКА САМОЛЕТА

Л. Л. Вышинский¹, Ю. А. Флёров²

Аннотация: Статья посвящена вопросам автоматизации задач, связанных с формированием весового облика на начальном этапе проектирования самолетов. На этом этапе создаются основные структуры информационной весовой модели изделия, которая детализируется, совершенствуется и используется в течение всего жизненного цикла, в том числе на этапах производства и эксплуатации. Описан разработанный авторами программный продукт, который является инструментом, предназначенным для использования при проектировании самолетов разного типа и назначения.

Ключевые слова: математическое моделирование; автоматизация проектирования; самолет; формирование облика; весовое проектирование; весовая модель; дерево конструкции; генератор проектов

DOI: 10.14357/19922264210413

1 Задача формирования весового облика самолета

Фундаментальная научная проблема, которая встает в самом начале создания сложных технических систем, состоит в решении двух основных концептуальных задач: задачи параметрического синтеза математической модели будущей системы (генерация множества альтернатив системы и выбор эффективных вариантов) и задачи анализа конкретных альтернатив системы (определение функциональных характеристик данной альтернативы системы и выяснение их соответствия целевому назначению). Решение этой двуединой задачи на начальной стадии проектирования летательных аппаратов (ЛА) принято называть формированием облика [1].

Под конструктивными параметрами ЛА будем понимать те параметры, совокупность которых определяет его компоновочную схему, а также состав и взаимосвязи основных агрегатов ЛА. Пусть $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$, где x — вектор конструктивных параметров и характеристик ЛА; X — множество допустимых вариантов компоновок ЛА. Формирование облика ЛА есть задача определения вектора x , обеспечивающего достижение поставленных целей. На практике цели проектирования формулируются как оптимизация значений некоторого набора частных критериев (летно-технические характеристики, характеристики двигателя, крыла, фюзеляжа, весовые показатели, оценки стоимости и другие величины). Пусть $F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_m(x))$ — вектор част-

ных критериев эффективности, размерность которого много меньше размерности пространства конструктивных параметров. Можно считать, что все частные критерии положительны и их значения нужно увеличивать. Решением задачи многокритериальной оптимизации $y = \max_x F(x)$ является паретовская (недоминируемая) граница множества $F(x)$ при допустимых значениях $x \in X$.

Одним из важнейших частных критериев при проектировании самолетов любого типа служит его весовая эффективность — отношение массы полезной нагрузки (целевая нагрузка плюс масса топлива) к взлетной массе самолета. Эти два весовых параметра связаны между собой фундаментальным соотношением весового баланса, которое имеет следующий вид:

$$M_{ВЗЛ} = M_{ПЛАН} + M_{СУ} + M_{ОБ} + M_{БРЭО} + \\ + M_{ЭК_СН} + M_{ЦЕЛ_НАГР} + M_{ТОП},$$

где $M_{ВЗЛ}$ — расчетная взлетная масса самолета; $M_{ПЛАН}$ — масса планера самолета, его несущей конструкции; $M_{СУ}$ — масса силовой установки, обеспечивающей перемещение ЛА; $M_{ОБ}$ — масса бортового оборудования, обеспечивающего управление ЛА; $M_{БРЭО}$ — масса бортового оборудования различного целевого назначения; $M_{ЭК_СН}$ — масса экипажа и полетного снаряжения; $M_{ЦЕЛ_НАГР}$ — масса целевой, или коммерческой, нагрузки; $M_{ТОП}$ — расчетная стартовая масса топлива.

Одна из центральных задач начального этапа проектирования самолетов — оценка значений пе-

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

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

речисленных величин. Такую задачу будем называть формированием весового облика самолета.

Кроме основных весовых параметров в состав весового облика включают и ряд производных величин, которые характеризуют конструктивные, эксплуатационные, эконометрические и другие свойства самолета. К наиболее часто используемым производным весовым параметрам весового облика ЛА относятся:

$M_{ПУСТ} = M_{ПЛАН} + M_{СУ} + M_{ОБ} + M_{БРЭО}$ — масса пустого самолета;

$M_{СНАР} = M_{ПУСТ} + M_{ЭК.СН}$ — масса снаряженного самолета;

$\bar{m}_{ПЛАН} = M_{ПЛАН}/M_{ВЗЛ}$ — относительная масса планера;

$\bar{m}_{СУ} = M_{СУ}/M_{ВЗЛ}$ — относительная масса силовой установки;

$\bar{m}_{ОБ} = M_{ОБ}/M_{ВЗЛ}$ — относительная масса самолетного оборудования;

$\bar{m}_{ТОП} = M_{ТОП}/M_{ВЗЛ}$ — относительная масса топлива;

$F_M = \bar{m}_{ПОЛ.НАГР} = (M_{ЦЕЛ.НАГР} + M_{ТОП})/M_{ВЗЛ}$ — весовая эффективность ЛА.

Формирование весового облика самолета начинается в условиях значительной неопределенности, когда заданы лишь общие требования к проектируемому изделию. Основное требование состоит в транспортировке целевой нагрузки, которое выражается в задании расчетной и максимальной массы нагрузки — $M_{ЦЕЛ.НАГР}$. Перечень задач, которые при этом должен решать проектируемый ЛА, задается дальностью крейсерского полета и другими летно-техническими и взлетно-посадочными характеристиками. Ряд задач может потребовать размещения радиоэлектронного оборудования, которое задается своей массой — $M_{БРЭО}$. Заметим, что формирование весового облика — это только одна из задач в ряду расчетов геометрических, аэродинамических, летно-технических и взлетно-посадочных характеристик самолета. Приближенные оценки массы на начальных стадиях проектирования могут быть получены исходя из предыдущего опыта проектирования. Это так называемое проектирование «от прототипов». Метод проектирования «от прототипа» наиболее эффективен, когда идет речь о модификации и даже глубокой модификации серийных изделий. Анализ тенденций развития отдельных аспектов проектирования позволяет выявить определенные закономерности и связи между различными конструктивными параметрами самолетов и их характеристиками. В весовом проектировании ЛА говорят об анализе весовой «статистики»,

имея в виду методы регрессионного анализа, который осуществляется на выборках некоторого множества прототипов. При разумном подходе сравнительный анализ, например применение традиционного критерия среднеквадратичного отклонения по представительной выборке прототипов, вполне может быть полезен для оценки взлетной массы, массы пустого ЛА, массы основных его агрегатов — крыла, фюзеляжа, оперения, самолетного оборудования и пр. Для реализации такого подхода нужна целенаправленная работа по сбору и хранению информации о существующих тенденциях и о готовых изделиях.

Вторым традиционным методом оценки весовых параметров ЛА и его агрегатов на этапе формирования облика стало применение так называемых «весовых формул». Весовые формулы — это арифметические выражения, зависящие от небольшого числа конструктивных параметров компоновочной схемы ЛА, которые, по идее, должны отражать их влияние на значение массы изделия и его агрегатов. Эти эмпирически выведенные зависимости верифицируются на выборках прототипов и в ограниченных диапазонах значений своих параметров могут давать неплохие результаты. Для реализации этого подхода необходимо иметь возможность построения, модификации, параметрического анализа и верификации формул.

Как видно, весовые расчеты на начальном этапе проектирования ЛА существенным образом опираются на инженерный опыт предыдущих разработок. Поэтому важной и необходимой задачей автоматизации весового проектирования, особенно на начальных этапах, становится накопление весовых данных о проектируемых и готовых изделиях в специально организованной базе данных (БД) потенциальных прототипов ЛА.

В настоящей статье описывается программный модуль формирования весового облика самолета, разработанный в рамках создания системы автоматизации весового проектирования ЛА [2]. В качестве первичной задачи в программе решается задача создания БД весовых моделей самолетов разных типов.

2 База данных весовых моделей самолета

База данных весовых моделей ЛА — это основное хранилище весовой информации по создаваемым проектам ЛА. В то же время такая БД может служить архивом весовых моделей существующих серийных самолетов, которые могут быть исполь-

ТИПЫ и НАЗНАЧЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	БАЗА ДАННЫХ ВЕСОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ					
	Обозначение	Производитель	Сост...	Год	Класс. по Мвзл	Скорость
А САМОЛЕТЫ	A	ФИЦ ИУ РАН	Мат...	2021	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.1 ВОЕННЫЕ	A.1	ФИЦ ИУ РАН	Мат...	2021	3 кл. (10-30 т)	сверхзвуковс
• А.1.1 ШТУРМОВИКИ	A300-600R	Airbus Industrie	Сер...	1974	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.1.2 ПЕРЕХВАТЧИКИ	A310-200	Airbus Industrie	Сер...	1983	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.1.3 ИСТРЕБИТЕЛИ	A340-300	Airbus Industrie	Сер...	1987	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.1.4 ИСТРЕБИТЕЛИ-БОМБАРДИРОВЩИИ	B767-300ER	Boeing	Сер...	1981	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.1.5 ФРОНТОВЫЕ БОМБАРДИРОВЩИКИ	B777-200	Boeing	Сер...	1981	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.1.6 СТРАТЕГИЧЕСКИЕ БОМБАРДИРОВИ	B787-8	Boeing	Сер...	2009	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.1.7 РАКЕТОНОСЦЫ	C-141A	Lockheed США	Сер...	1965	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.1.8 ВОЕННО-ТРАНСПОРТНЫЕ	F-15	McDonnell Douglas ...	Сер...	1972	2 кл. (30-75 т)	сверхзвуковс
• А.1.9 ВОЕННЫЕ БЕСПИЛОТНЫЕ ЛА	F-22	Lockheed/Boeing С...	Сер...	2001	2 кл. (30-75 т)	сверхзвуковс
• А.2 ГРАЖДАНСКИЕ	MQ-1 Predator	General Atomics США	Сер...	1894	легкомоторный	дозвуковой
• А.2.1 ПАССАЖИРСКИЕ	SI-100	ГСС Россия	Сер...	2008	2 кл. (30-75 т)	дозвуковой
• А.2.1.1 МАГИСТРАЛЬНЫЕ	АН-12	ОКБ Антонова	Сер...	1957	2 кл. (30-75 т)	дозвуковой
• А.2.1.1.1 ШИРОКОФЮЗЕЛЯЖНЫЕ	АН-8	ОКБ Антонова СССР	Сер...	1958	2 кл. (30-75 т)	дозвуковой
• А.2.1.1.2 УЗКОФЮЗЕЛЯЖНЫЕ	ИЛ-86	ОКБ Ильюшина	Сер...	1976	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.2.1.2 РЕГИОНАЛЬНЫЕ	ИЛ-96	ОКБ Ильюшина	Сер...	1988	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.2.1.3 МЕСТНЫЕ	ИЛ-276	ПАО ИЛ	Опы...	2023	2 кл. (30-75 т)	дозвуковой
• А.2.2 ТРАНСПОРТНЫЕ	ИЛ-62	ПАО ИЛ	Сер...	1963	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.2.3 САНИТАРНЫЕ	ИЛ-76ТД	ПАО ИЛ	Сер...	1981	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.2.4 ПОЖАРНЫЕ	KC390	Embraer Бразилия	Сер...	2015	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой
• А.2.5 ПОЧТОВЫЕ	МИГ-15	ОКБ Микояна	Сер...	1948	2 кл. (5-10 т)	дозвуковой
• А.2.6 ГРАЖДАНСКИЕ БЕСПИЛОТНЫЕ ЛА	МИГ-21	ОКБ Микояна	Сер...	1959	2 кл. (5-10 т)	сверхзвуковс
	МИГ-29	ОКБ Микояна	Сер...	1987	3 кл. (10-30 т)	сверхзвуковс
	ОБЛИК ЛА	ЦП ВП ЛА	Мат...	2021	1 кл. (>=75 т)	дозвуковой

Рис. 1 Реестр весовых моделей ЛА

зованы в качестве прототипов в новых проектах. Внесение весовой информации о самолетах разных типов, разных производителей, разных лет выпуска в БД весовых моделей позволит создать широкий спектр полезной информации для проектирования новых изделий. В целях систематизации архивной информации в БД весовых моделей используется классификатор типов самолетов по их назначению. Классификатор самолетов, как и другая нормативная информация, создается и модифицируется в системе весового проектирования, в рамках которой разработан модуль формирования весового облика. Основной структурой систематизации и упорядочения весовых моделей служит реестр, содержащий идентификационные атрибуты ЛА, весовые модели которых создаются в БД. На рис. 1 приведена экранная форма, в которой выводится реестр весовых моделей ЛА.

Каждой записи в реестре соответствует информационная структура весовой модели изделия. Структура и состав параметров весовых моделей существенно зависят от типа и назначения ЛА. Синтез и анализ весовых моделей являются основными задачами разработанного модуля.

Структурно-параметрическая весовая модель самолета наряду с электронным геометрическим макетом считается важнейшим информационным объектом, который создается в процессе проектирования, развивается, модифицируется и используется в процессе всего жизненного цикла изделия вплоть до серийного производства, сдачи в эксплуатацию, длительного периода эксплуатации, списания и утилизации. Задача создания весовой модели ЛА состоит в описании множества параметров ЛА

и области допустимых конструкций в пространстве этих параметров. Весовая модель ЛА представляет собой структурно-параметрическую модель следующего вида:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

$$\text{где для всех } i \ x_i \in X_i | P(x_1, \dots, x_n) \};$$

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im_i}\},$$

$$\text{где для всех } j \ x_{ij} \in X_{ij} | P_i(x_1, \dots, x_n) \};$$

$$\dots$$

Здесь $\{x_i\}$ — конструктивные параметры и характеристики (векторы параметров) ЛА, а множества X_i, X_{ij}, \dots представляют собой модели агрегатов самолета и образуют иерархию, которую принято называть деревом конструкции. Предикаты $\{P, P_i, \dots\}$ определяют множество допустимых конструкций в пространстве конструктивных параметров и характеристик ЛА.

3 Пространство конструктивных параметров и характеристик летательного аппарата

Как было сказано выше, основой весового облика ЛА служит набор абсолютных, относительных и безразмерных параметров массы основных структурных компонентов самолета — взлетная масса, масса планера, масса силовой установки, масса самолетного и специального оборудования, масса целевой нагрузки и топлива. Область существования ЛА в пространстве эксплуатационных характеристик задается в тактико-технических требованиях

к ЛА — это взлетная и посадочная дистанция; диапазон скоростей на разных высотах; практический потолок; дальность полета в крейсерском режиме, или перегоночная дальность; максимально допустимая аэродинамическая перегрузка и другие параметры. Набор таких параметров зависит от типа ЛА. Область существования вместе с требуемой максимальной перевозимой нагрузкой фактически определяют весовую категорию самолета.

Второй группой параметров, необходимых при весовых расчетах, выступают конструктивные параметры компоновочной схемы. К таким параметрам относятся габаритные размеры ЛА, площадь и геометрия несущих поверхностей, площадь омываемой поверхности, располагаемые внутренние объемы и ряд других параметров. Параметры агрегатов ЛА, положение агрегатов относительно друг друга и другие геометрические характеристики — это тоже параметры компоновочной схемы. Состав основных агрегатов планера, силовой установки и оборудования задается деревом конструкции, каждый узел которого соответствует определенному агрегату изделия. Узлы дерева конструкции характеризуются своими параметрами и рядом соотношений между ними. Таким образом, дерево конструкции представляет собой иерархию связанных между собой моделей агрегатов ЛА. Отношения между агрегатами, например отношения вложенности, взаимное расположение, аэродинамическое влияние друг на друга и пр., также могут быть выражены через дополнительные параметры и соотношения. В качестве таких параметров используются: стартовая тяговооруженность, удельная нагрузка на крыло, аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы, аэродинамическое качество и другие принятые в авиастроении величины.

В рамках разработанного модуля в весовую модель можно вводить любые параметры и соотношения, способствующие вычислению значений основных базовых параметров весового облика. Это в определенной степени расширяет возможности проектировщиков для проведения исследований и для анализа различных вариантов компоновочных схем и допустимых конструкций. При создании новых параметров весовой модели вводятся следующие данные:

- уникальный в рамках весовой модели идентификатор параметра;
- наименование параметра;
- тип параметра (число, логический или перечислимый тип);
- текущее значение параметра;

- формула параметра (арифметическое или логическое выражение);
- минимально допустимое значение параметра;
- максимально допустимое значение параметра;
- статус параметра в весовой модели — конструктивный параметр, функция;
- текущее состояние параметра — определен, не определен, выходит за ограничения допустимого диапазона.

Операндами арифметических или логических выражений для вычисления параметров могут быть числовые или логические константы, идентификаторы любых параметров весовой модели, встроенные функции и функции, описанные в весовой модели.

Полный список параметров весовой модели включает параметры верхнего уровня и параметры моделей конструктивных компонентов ЛА. Компоненты ЛА по своей роли в весовой модели разделяются на постоянную конструкцию и переменные составляющие взлетной конфигурации ЛА — снаряжение, целевая нагрузка и топливо. Переменные компоненты рассматриваются в весовой модели как размещаемые на борту готовые изделия, весовые характеристики которых известны. Постоянные компоненты ЛА объединяются в единую конструкцию, которую называют пустым ЛА. Понятие дерева конструкции относится к пустому ЛА. На рис. 2 приведен пример списка параметров верхнего уровня и дерева конструкции пустого ЛА.

Каждому узлу дерева конструкции соответствует определенный агрегат ЛА, сборочная единица или деталь. При формировании облика до деталей дело не доходит и узлам дерева конструкции соответствуют модели основных агрегатов и систем ЛА, которые в процессе проектирования будут уточняться и детализироваться.

Каждый узел дерева конструкции весовой модели имеет фиксированный набор атрибутов:

- ID — идентификатор узла;
- название агрегата (совпадает с названием соответствующего раздела классификатора);
- M — текущая масса агрегата, точнее, текущая оценка массы агрегата, которая может использоваться при расчетах характеристик ЛА;
- $M_{\text{ТЕОР}}$ — теоретическая масса — целевая характеристика массы агрегата на этапе формирования весового облика;
- $X_{\text{ЦМ}}$, $Y_{\text{ЦМ}}$ и $Z_{\text{ЦМ}}$ — координаты центра масс агрегата в самолетной системе координат.

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗДЕЛИЯ С-9						ДЕРЕВО КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	
Наименование	ID	Значение	Формула	min	max	Наименование	M
ПАРАМЕТРЫ ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЛА						ПУСТОЙ	7846.000
МАКСИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО МАХА	Mмакс	2.000	2	0.500	3.000	ПЛАНЕР	3552.100
1 МАКСИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ (H>11 км/ч)	Vмакс	2124.000	$3600 * 0.295 \dots$	0.000	3000.000	КРЫЛО	962.000
ПРАКТИЧЕСКИЙ ПОТОЛОК (км)	Hпот	20.000	20	0.000	30.000	ЦЕНТРОПЛАН	0.000
СКОРОСТЬ КРЕЙСЕРСКОГО ПОЛЕТА (км/ч)	Vкрейс	800.000	800	0.000	1000.000	ОТЪЕМНАЯ ЧАСТЬ КРЫЛА (ОЧК)	962.000
ДАЛЬНОСТЬ КРЕЙСЕРСКОГО ПОЛЕТА (км)	Lкрейс	1400.000	1400	0.000	3000.000	МЕХАНИЗАЦИЯ ПЕРЕДНЕЙ КР...	0.000
ДЛИНА РАЗБЕГА (м)	Lразб	830.000	830	0.000	1800.000	ОЧК БЕЗ МЕХАНИЗАЦИИ	874.000
ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НОРМАЛЬНАЯ ПЕРЕГ...	ny_max	7.000	7	0.000	10.000	МЕХАНИЗАЦИЯ ЗАДНЕЙ КРОМ...	88.000
МАКСИМАЛЬНАЯ МАССА ЦЕЛЕВОЙ НАГРУЗ...	Mнагр.макс	400.000	400	0.000	2000.000	ФЮЗЕЛЯЖ	1693.000
РАСЧЕТНАЯ МАССА ЦЕЛЕВОЙ НАГРУЗКИ - (кг)	Mнагр	328.000	328	0.000	3000.000	ГОЛОВНАЯ ЧАСТЬ ФЮЗЕЛЯЖА	1169.600
МАССА УСТАНОВЛИВАЕМОГО БРЭО	Mбрэо	756.000	756	500.000	900.000	ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ФЮЗЕЛЯЖА	0.000
ПАРАМЕТРЫ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ						ХВОСТОВАЯ ЧАСТЬ ФЮЗЕЛЯЖА	458.700
РАЗМАХ КРЫЛА (м)	Lкр	8.536	8.536	0.000	10.000	ФОНАРЬ	64.700
ГАБАРИТНАЯ ДЛИНА (м)	Lгаб	18.000	18	0.000	20.000	ОПЕРЕНИЕ	290.000
ГАБАРИТНАЯ ВЫСОТА (М)	Hгаб	4.500	4.5	0.000	6.000	ВПУ	502.000
ПЛОЩАДЬ БАЗОВОЙ ТРАПЕЦИИ КРЫЛА (м.кв)	Sбаз	34.000	34	0.000	50.000	СПЕЦ. ЗАЩИТА	105.100
ПЛОЩАДЬ МИДЕЛЯ САМОЛЕТА (м.кв)	Sмид	9.222	$S_{\text{мид}} \cdot \phi * 1.1$	0.000	10.000	СИЛОВАЯ УСТАНОВКА	2552.600
ПЛОЩАДЬ ОМЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ С...	Sом	154.252	$S_{\text{ом}}$	0.000	1000.000	ДВИГАТЕЛИ (СУХАЯ МАССА)	2050.000
ПОЛНЫЙ ОБЪЕМ САМОЛЕТА (м.кв)	Vпол	0.000	0	0.000	0.000	АГРЕГАТЫ В ПОСТАВКЕ	258.000
ПАРАМЕТРЫ ВЕСОВОГО ОБЛИКА						УСТАНОВКА ДВИГАТЕЛЕЙ	19.400
ПЕРВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ВЗЛЕТНОЙ МАССЫ (т)	M_0	12244.444	$(M_{\text{нагр}} + M_{\dots})$	5000.000	170000.000	ТОПЛИВНАЯ СИСТЕМА	163.200
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МАССА ПЛАНЕРА	M_пл	0.280	0.28	0.280	0.320	ДРУГИЕ СИСТЕМЫ СУ	62.000
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МАССА СНАРЯЖЕНИЯ	M_сн	0.023	0.023	0.020	0.025	ОБОРУДОВАНИЕ	1741.300
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МАССА СИЛОВОЙ УСТАН...	M_су	0.200	0.2	0.180	0.220	САМОЛЕТНЫЕ СИСТЕМЫ	984.500
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МАССА САМОЛЕТНОГО ОБ...	M_об	0.100	0.1	0.000	0.140	ЭНЕРГОСИСТЕМЫ	492.500
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МАССА ТОПЛИВА	M_топ	0.300	0.3	0.250	0.300	ЭЛЕКТРОСИСТЕМА	261.000
УДЕЛЬНАЯ ВЗЛЕТНАЯ НАГРУЗКА НА КРЫЛО	p0	341.000	$\text{Мезл} / S_{\text{баз}}$	0.000	500.000	ГИДРОСИСТЕМА	212.500
СТАРТОВАЯ ТЯГОВООРУЖЕННОСТЬ	P0_M	0.840	0.84	0.000	1.000	ПНЕВМОСИСТЕМА	19.000
РАСЧЕТНАЯ ВЗЛЕТНАЯ МАССА	Mезл	11594.000	$M_{\text{снар}} + M_{\dots}$	0.000	60000.000	СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИЗД. И А...	289.400
МАССА СНАРЯЖЕННОГО ИЗДЕЛИЯ (кг)	Mснар	8166.000	$M_{\text{пуст}} + E_{\text{Q}} \dots$	0.000	60000.000	СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ	202.600
МАССА ПУСТОГО ИЗДЕЛИЯ (кг)	Mпуст	7846.000	F.1.M	0.000	60000.000	СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	756.800
МАССА ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ (кг)	Mнагр	3428.000	$M_{\text{нагр}} + M_{\dots}$	0.000	6000.000	БРЭО	756.800

Рис. 2 Список параметров верхнего уровня и дерево конструкции ЛА

Каждому узлу дерева конструкций кроме перечисленных параметров может быть приписано произвольное множество дополнительных параметров, описывающих специфику соответствующего агрегата.

Таким образом, полное пространство параметров весовой модели ЛА состоит из параметров верхнего уровня и параметров дерева конструкции пустого ЛА. Основная функция модуля формирования весового облика — это вычисление всех введенных на этом этапе параметров и формирование начального состояния дерева конструкции. На последующих этапах проектирования состав и значения параметров, а также дерево конструкции будут уточняться и детализироваться.

4 Весовые расчеты в модуле формирования весового облика

Весовая модель ЛА — основной инструмент формирования весового облика, в процессе которого строятся приближенные оценки массы ЛА и его основных агрегатов. Модуль формирования весового облика — предметно-ориентированный калькулятор, который, в отличие, например, от такого популярного вычислительного инструмента, как

Excel, позволяет систематизировать и структурировать информацию при работе с компоновочной схемой ЛА, с деревом его конструкции, с моделями агрегатов ЛА, с БД прототипов проектируемых изделий. Здесь нет однозначного алгоритма решения некоторой заранее сформулированной задачи. Такую задачу заранее сформулировать невозможно, поскольку и конструкция ЛА, и состав параметров, и соотношения между ними могут сильно зависеть от конкретных требований и условий проектирования. Основная функция программы состоит в том, чтобы предоставить инженеру возможности для постановки различных вычислительных задач, связанных с оценкой массы ЛА и его агрегатов на начальных этапах проектирования самолетов. Важную роль в любых инженерных вычислениях играет возможность проведения параметрических расчетов. Приведем в качестве примера проведение параметрических расчетов при построении первого приближения взлетной массы самолета. Для этого будет использовано базовое соотношение весовой модели ЛА — уравнение весового баланса.

Перепишем уравнение весового баланса в следующем виде:

$$M_{\text{ВЗЛ}} = \frac{M_{\text{ЦЕЛ.НАГР}} + M_{\text{ЭК.СН}} + M_{\text{БРЭО}}}{1 - \overline{m}_{\text{ПЛАН}} - \overline{m}_{\text{СУ}} - \overline{m}_{\text{ОБ}} - \overline{m}_{\text{ТОП}}}$$

Значение $M_{\text{ЦЕЛ_НАГР}}$ устанавливается в основных требованиях к проектируемому самолету. По массе целевой нагрузки, назначению и перечню основных задач с достаточной точностью для начального приближения можно определить массу состава экипажа, массу базового и специального снаряжения $M_{\text{ЭК_СН}}$, а также состав и массу стандартного и специального радиоэлектронного оборудования $M_{\text{БРЭО}}$. Значения относительных параметров $\bar{m}_{\text{ПЛАН}}$, $\bar{m}_{\text{СУ}}$, $\bar{m}_{\text{ОБ}}$ и $\bar{m}_{\text{ТОП}}$ достаточно консервативны и меняются в небольших пределах, которые зависят от типа ЛА и его конструкции. В учебнике по проектированию самолетов [3] приведена таблица диапазонов значений параметров для самолетов различного назначения и различных весовых категорий. Эта информация — результат обработки данных по большому числу самолетов. Воспользуемся в качестве примера данными из таблицы для легких истребителей при построении начального приближения взлетной массы, которое обозначим M_0 . Средствами модуля формирования весового облика можно провести параметрические исследования зависимости M_0 от $M_{\text{ЦЕЛ_НАГР}}$, $M_{\text{ЭК_СН}}$, $M_{\text{БРЭО}}$, а также от безразмерных параметров в заданных диапазонах $0,25 \leq \bar{m}_{\text{ПЛАН}} \leq 0,32$; $0,18 \leq \bar{m}_{\text{СУ}} \leq 0,22$; $0,12 \leq \bar{m}_{\text{ОБ}} \leq 0,14$ и $0,25 \leq \bar{m}_{\text{ТОП}} \leq 0,30$. Приведенные диапазоны относительных параметров, взятые из учебника, достаточно условны и могут быть уточнены по БД прототипов. На рис. 3 приведены результаты параметрических расчетов, где M_0 представлена в виде функции двух параметров — свертки величин $\bar{m}_{\text{ПЛАН}}$, $\bar{m}_{\text{СУ}}$, $\bar{m}_{\text{ОБ}}$ и $\bar{m}_{\text{ТОП}}$ и массы целевой нагрузки $M_{\text{ЦЕЛ_НАГР}}$ при фиксированных $M_{\text{ЭК_СН}}$ и $M_{\text{БРЭО}}$.

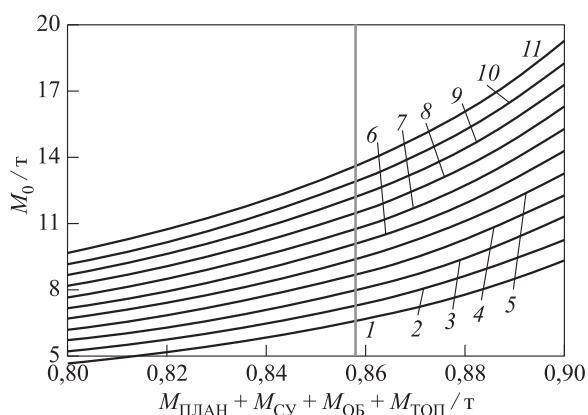


Рис. 3 Параметрические расчеты начального приближения массы ЛА: 1 — $M_{\text{НАГР}} = 0,4$ т; 2 — 0,5; 3 — 0,6; 4 — 0,7; 5 — 0,8; 6 — 0,9; 7 — 1,0; 8 — 1,1; 9 — 1,2; 10 — 1,3; 11 — $M_{\text{НАГР}} = 1,4$ т

При задании некоторого значения свертки относительных параметров массы (вертикальная линия при значении $\sim 0,857$) можно получить приближенные оценки взлетной массы при различных вариантах целевой нагрузки.

Приведенный пример параметрических расчетов учитывает лишь один важный фактор, от которого зависит взлетная масса самолета, — целевую нагрузку. Но подобные расчеты могут дать лишь некоторое представление о той весовой категории, в которой реально может существовать проектируемый самолет. Имеется еще ряд параметров, от которых во многом зависит весовой облик самолета. Такими параметрами могут быть требуемая дальность полета, максимальная достижимая скорость, практический потолок, дистанция разбега при взлете и другие величины. Для анализа влияния этих параметров на параметры массы самолета, вообще говоря, требуются аэродинамические расчеты, расчеты летно-технических и взлетно-посадочных характеристик. На начальных этапах проектирования возможно применение упрощенных моделей таких расчетов, применение эмпирических формул, которые могут быть получены в результате анализа некоторой выборки прототипов, близких к проектируемому самолету по типу и решаемым задачам. Существенно больше возможностей для анализа параметров весового облика появляется у проектировщика в процессе построения компоновочной схемы самолета, когда можно использовать конструктивные параметры основных агрегатов самолета, от которых зависят весовые характеристики. Основным инструментом на этапе формирования облика служит построение весовых формул. Весовые формулы, как правило, представляют собой функции конструктивных параметров, которые содержат множество эмпирических коэффициентов. Они выводятся из общих физических соображений и отражают влияние тех или иных параметров на вес конструкции ЛА. Естественно, такие эмпирические зависимости нуждаются в верификации. Множество прототипов, на которых ведется проверка формул, должно соответствовать задачам проектируемого самолета.

На рис. 4 приведен пример верификации эмпирических формул для расчета M_0 — первого приближения взлетной массы (рис. 4, а) — и формулы для расчета $M_{\text{снар}}$ — массы пустого снаряженного пассажирского самолета (рис. 4, б). Под верификацией здесь понимается применение стандартной процедуры анализа среднеквадратичного отклонения от линии парной линейной регрессии, порожденной верифицируемой весовой формулой на выборке прототипов из БД. Здесь трудно говорить о какой-то математической строгости такой вери-

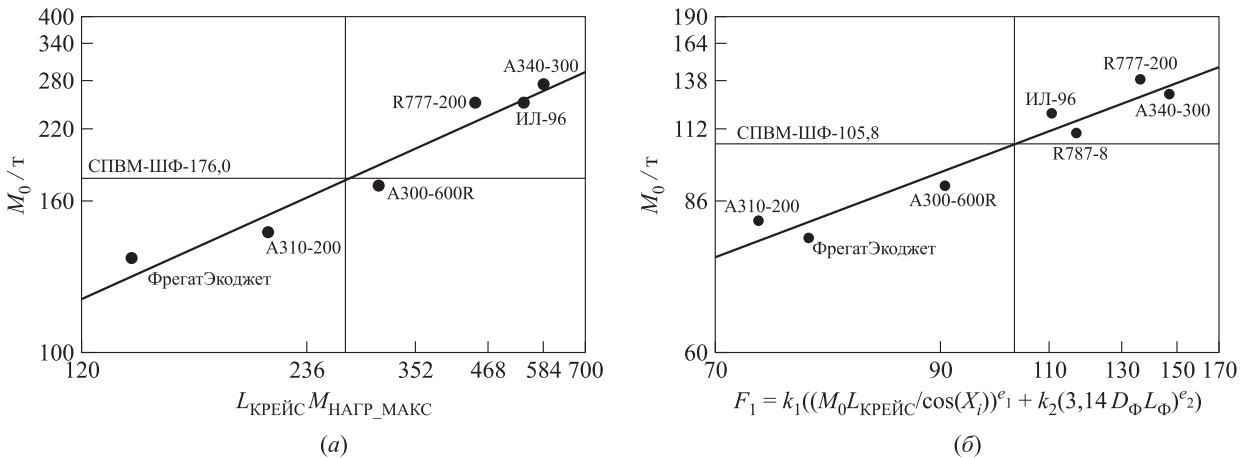


Рис. 4 Верификация весовых формул по выборке прототипов

фикации по двум причинам. Во-первых, выборки прототипов не могут быть большими в силу того, что прототипов, схожих по выполняемым задачам, не может быть очень много. И, во-вторых, как правило, самолеты, выпускаемые одной компанией (консорциумом), не могут рассматриваться как независимые сущности, что вообще-то важно для методов регрессионного анализа. Тем не менее с инженерной точки зрения грамотно построенные формульные зависимости отражают качественный характер физических закономерностей, а их верификация (в приведенном понимании) предоставляет возможность убедиться в этом. Формальные критерии оценки достоверности результатов расчета по эмпирическим «весовым формулам» здесь вряд ли уместны, но их сравнительный качественный анализ может быть полезным при прогнозировании массы ЛА. На данном этапе, когда для точных математических расчетов не хватает информации, принятие решения остается за инженером-проектировщиком.

Заметим, что если расчет по формуле, представленной на рис. 4, а ($M_0 = k_0 L_{крейс} M_{нагр_макс}$), можно рассматривать как первое приближение, то в формуле рис. 4, б ($M_{снар} = k_1((M_0 L_{крейс} / \cos(X_i))^{e_1} + k_2(3,14 D_{\phi} L_{\phi})^{e_2})$), зависящей от параметров компоновочной схемы, используется это приближение.

Таким образом, процесс формирования облика может быть организован как итеративный процесс уточнения и детализации весовых прогнозов. Следующий шаг в этом направлении — более детальное рассмотрение весовых характеристик основных агрегатов дерева конструкции пустого ЛА:

$$M_{снар} = M_{пуст} + M_{эк.сн},$$

где

$$M_{пуст} = M_{с} + M_{су} + M_{об},$$

и далее вниз по дереву конструкции планера

$$M_{план} = M_{крейс} + M_{фюз} + M_{го} + M_{во} + M_{впу}.$$

Для каждого из агрегатов планера, силовой установки и оборудования в модуле формирования весового облика может быть построена своя параметрическая модель, а при необходимости и модели структурных компонентов нижнего уровня.

На рис. 5 представлена параметрическая модель отъемной части крыла. В этой модели приведены две весовые формулы для расчета массы крыла, взятые из книги [4].

В модуле формирования весового облика решается еще одна важная задача весового проектирования — анализ центровки компоновочной схемы самолета и выбор мест размещения на борту целевых грузов и топлива. Задача центровки связана с обеспечением устойчивости и управляемости ЛА как в полете, так и на земле. Эти характеристики зависят от положения центра масс по отношению к центру приложения аэродинамических сил, аэродинамическому фокусу, а также к положению опор взлетно-посадочных устройств. Положение аэродинамического фокуса зависит от формы в плане несущих поверхностей ЛА и определяется аэродинамикой уже на ранних стадиях проектирования.

Вся информация, необходимая модулю формирования весового облика для анализа центровки, приходит вместе с компоновочной схемой в виде диапазона допустимых положений центра масс самолета — предельно передней и предельно задней центровок. Центровка может задаваться в абсолютных величинах, но, как правило, она задается в процентах от средней аэродинамической хорды. Средняя аэродинамическая хорда вместе с площадью

ПАРАМЕТРЫ АГРЕГАТА ДЕРЕВА КОНСТРУКЦИИ			
Наименование	ID	Формула	Значение
Базовая трапеция - площадь	S	392	392.000
Размах крыла	L_разм	58	58.000
Базовая трапеция - стреловидность по...	Xi	20	20.000
Базовая трапеция - сужение	Eta	3	3.000
Базовая трапеция - удлинение	La	L_разм * L_разм / S	8.582
Длина бортовой хорды	V_борт	B_0 * 2.0 * L_конс / L_разм	9.089
Длина консольной части крыла	L_конс	L_разм / 2.0 - Z_6х	26.000
Длина корневой хорды	B_0	S * Eta * 2.0 / ((Eta+1.0) * L_разм)	10.138
Длина концевой хорды	V_конц	B_0 / Eta	3.379
Координата X бортовой хорды	X_6х	7.5	7.500
Координата Y бортовой хорды	Y_6х	D_ф / 2.0	3.000
Координата Z бортовой хорды	Z_6х	D_ф / 2.0	3.000
Относительная толщина профиля кр...	C_пр_кр	0.08	0.080
Площадь оmyиваемой поверхности ко...	S_ом_к...	2.0 * (S - S_цп) * Sqrt(1+C_пр_кр*C_пр_кр*0.0001)	668.638
Площадь подфюзеляжной части крыла	S_цп	(B_0 + V_борт) * D_ф / 2.0	57.681
Формула Дрисга для массы крыла	M_кр2	0.15 * (1.68 - 1.47 * M_топ) * (ny_max * Mвэл * (L_разм ^ 3.0) / (La * Cos(Xi * 6.28 / 360.0))) ^ 0.5	24440.709
Формула массы крыла Козловского	M_кр1	0.01 * (ny_max * Mвэл * L_разм / Cos(Xi * 6.28 / 360.0)) ^ 0.835	25157.763

Рис. 5 Параметрическая модель отъемной части крыла

базовой несущей трапеции крыла служат общепринятыми характерными величинами, участвующими во многих проектировочных расчетах. Задача анализа центровки состоит в определении координат центра масс самолета и проверки ограничений заданного диапазона. Центр масс ЛА определяется из основного соотношения, которое в модуле формирования облика рассматривается наряду с уравнением весового баланса:

$$X_0 M_0 = X_{\text{ПУСТ}} M_{\text{ПУСТ}} + X_{\text{ЭК.СН}} M_{\text{ЭК.СН}} + X_{\text{ЦЕЛ.НАГР}} M_{\text{ЦЕЛ.НАГР}} + X_{\text{ТОП}} M_{\text{ТОП}}$$

В модуле формирования весового облика предусмотрена возможность задания упрощенных геометрических моделей топливных емкостей и рас-

чета их массы и координат их центра масс. Также в модуле формирования облика реализован механизм задания параметров целевой нагрузки.

Расчет $X_{\text{ПУСТ}}$ и $M_{\text{ПУСТ}}$ в модуле формирования весового облика реализован рекурсивным способом по дереву конструкции пустого ЛА снизу вверх. В каждом узле дерева конструкции выполняется единообразная процедура суммирования по подчиненным вершинам:

$$M = \sum_i M_i; \quad X = \frac{\sum_i X_i M_i}{N}$$

В результате таких расчетов может быть построена область допустимых центровок, в которой заданы положения центровки в различных конфигурациях.

На рис. 6 приведен пример построения области допустимых центровок. Приведенные на рис. 6 точки показывают положение центра масс в конфигурации пустого, снаряженного, загруженного и заправленного ЛА. Это крайние точки в процессе эксплуатации. Анализ изменения центровки в воздухе, при выработке топлива в полете, является более сложной задачей, которая решается в процессе разработки специальной системы управления выработкой топлива.

5 Заключение

По некоторым оценкам на этапе формирования облика самолета принимается до 70% технических проектных решений (см., например, [5, с. 72]). При формировании весового облика закладывается фундамент для достижения весового совершенства ЛА. Разработанный программный продукт



Рис. 6 Пример области допустимых центровок

служит инструментом для проектирования самолетов разных типов и назначения. С его помощью проектировщик может создать инфраструктуру для сбора и хранения весовой и другой полезной архивной информации по готовым самолетам, а затем использовать эту информацию в текущем проектировании. При разработке весовых моделей в БД может быть создано пространство весовых параметров, всесторонне описывающих проектируемые изделия. В рамках этой программы создаются структуры верхнего уровня дерева конструкции ЛА, разрабатываются параметрические модели основных агрегатов. На этом уровне могут вычисляться теоретические оценки массы агрегатов самолета и приниматься решения о назначении их лимитных весов.

Данная программа разработана как модуль системы весового проектирования, и вся информация, созданная в рамках данного модуля, предназначена для использования в других компонентах системы. Как и все другие компоненты системы весового проектирования ЛА, программа формирования весового облика разработана с помощью инструментального комплекса «Генератор проектов» [6].

Литература

1. Вышинский Л. Л., Самойлович О. С., Флёров Ю. А. Программный комплекс формирования облика летательных аппаратов // Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении. — М.: ВЦ АН СССР, 1991. С. 24–42.
2. Вышинский Л. Л., Флёров Ю. А., Широков Н. И. Автоматизированная система весового проектирования самолетов // Информатика и её применения, 2018. Т. 12. Вып. 1. С. 18–30. doi: 10.14357/19922264180103.
3. Проектирование самолетов / Под ред. М. А. Погосяна. — 5-е изд. — М.: Инновационное машиностроение, 2018. 864 с.
4. Шейнин В. М., Козловский В. И. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов. — М.: Машиностроение, 1977. Т. 1. 343 с.
5. Егер С. М., Лисейцев И. К., Самойлович О. С. Основы автоматизированного проектирования самолетов. — М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
6. Вышинский Л. Л., Гринев И. Л., Флеров Ю. А., Широков А. Н., Широков Н. И. Генератор проектов — инструментальный комплекс для разработки «клиент-серверных» систем // Информационные технологии и вычислительные системы, 2003. № 1-2. С. 6–25.

Поступила в редакцию 31.08.21

THEORETICAL FOUNDATION OF FORMATION OF AIRCRAFT WEIGHT APPEARANCE

L. L. Vyshinsky and Yu. A. Flerov

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

Abstract: The article is devoted to automation of tasks related to formation of weight appearance at the initial stage of aircraft design. At this stage, the main structures of the information weight model of the product are created which is detailed, improved, and used throughout the life cycle, including the stages of production and operation. The article presents not only the theoretical foundations of formation of aircraft weight appearance (design “from prototypes,” weight formulas) but also describes the software product developed by the authors which is a tool intended for use at the initial stage of designing aircraft of various types and purposes.

Keywords: mathematical modeling; computer aided design; aircraft; appearance formation; weight design; weight model; structure tree; project generator

DOI: 10.14357/19922264210413

References

1. Vyshinsky, L. L., O. S. Samoylovich, and Yu. A. Flerov. 1991. Programmnyy kompleks formirovaniya oblika letatel'nykh apparatov [Program complex for forming the appearance of aircraft]. *Zadachi i metody avtomatizirovannogo proektirovaniya v aviastroenii* [Tasks and methods of computer-aided design in aircraft industry]. Moscow: CC USSR AS. 24–42.
2. Vyshinskiy, L. L., Yu. A. Flerov, and N. I. Shirokov. 2018. Avtomatizirovannaya sistema vesovogo proektirovaniya samoletov [Automated system of weight design of aircraft]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 12(1):18–30. doi: 10.14357/19922264180103.

3. Pogosyan, M. A. ed. 2018. *Proektirovanie samoletov* [Aircraft design]. 5th ed. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie. 864 p.
4. Sheynin, V. M., and V. I. Kozlovskiy. 1977. *Vesovoe proektirovanie i effektivnost' passazhirskikh samoletov* [Weight design and efficiency of passenger aircraft]. Moscow: Mechanical Engineering. Vol. 1. 343 p.
5. Eger, S. M., I. K. Lisejcev, and O. S. Samojlovich. 1986. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya samoletov* [Fundamentals of aircraft automated design]. Moscow: Mashinostroenie. 232 p.
6. Vyshinskiy, L. L., I. L. Grinev, Yu. A. Flerov, A. N. Shirokov, and N. I. Shirokov. 2003. Generator proektov — instrumental'nyy kompleks dlya razrabotki “klient-servernykh” sistem [The project generator — tool complex for development of “client-server” systems]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [J. of Information Technologies and Computing Systems] 1-2:6–25.

Received August 31, 2021

Contributors

Vyshinsky Leonid L. (b. 1941) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, leading scientist, A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; wysh@ccas.ru

Flerov Yuri A. (b. 1942) — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science in physics and mathematics, professor, principal scientist, A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; fler@ccas.ru

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ВОЗ-ЦЕНТРА КОМПЕТЕНЦИЙ ПО ПАНДЕМИЯМ И ЭПИДЕМИЯМ: КЛЮЧЕВЫЕ ПОНЯТИЯ И ИХ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

И. М. Зацман¹

Аннотация: Рассматривается концепция автоматизированной системы, создаваемой по инициативе Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и получившей название ВОЗ-центр компетенций по пандемиям и эпидемиям (далее — ВОЗ-центр). В описании концепции используются такие англоязычные термины информатики, как data, information и knowledge (в словосочетаниях knowledge sharing, knowledge representation, knowledge exchange и knowledge generation). Понимание этой концепции как основы создания ВОЗ-центра во многом будет определяться их трактовкой, соответствующей ее общему смыслу. Необходимость создания подобных систем на национальном, региональном и глобальном уровнях обоснована в мае 2021 г. в отчете Международной комиссии экспертов, учрежденной ВОЗ, что придает актуальность анализу системы терминов концепции не только для создания ВОЗ-центра. Основная цель статьи состоит в том, чтобы провести анализ основных концептуальных положений его создания и предложить трактовку отдельных ключевых терминов концепции и их русскоязычные переводные эквиваленты, соответствующие ее общему смыслу. При этом показано, что для понимания этой концепции необходимо также выяснить значения и таких англоязычных терминов, как intelligence, context и insight. В случае перевода концепции на русский язык нужно также найти их русскоязычные переводные эквиваленты согласно контекстам их использования.

Ключевые слова: компетенции; данные; информация; знание; концепт; контекст; представление; терминологический анализ; среды предметной области информатики

DOI: 10.14357/19922264210414

1 Введение

Первого сентября 2021 г. в Берлине был основан WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence — ВОЗ-центр компетенций по пандемиям и эпидемиям² [1]. Концепция его создания опубликована на сайте ВОЗ [2]. При этом отмечено, что она будет регулярно пересматриваться по мере развития ВОЗ-центра. В русскоязычных СМИ, освещавших это событие, дано несколько переводов с английского языка названия этого центра, которые отличаются от предлагаемого в статье. Использовались, например, следующие варианты перевода:

- Центр *исследований* пандемий [3];
- Центр по *предотвращению* будущих пандемий [4];
- Центр *информации* о пандемиях и эпидемиях [5];
- Центр по пандемической и эпидемической *разведке* [6];
- Центр раннего *предупреждения* пандемии (Глобальный центр сбора информации о пандемиях и эпидемиях) [7].

Приведенный спектр русскоязычных названий, вероятно, говорит о трудностях перевода на русский язык термина intelligence в названии WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence. Это и дало несколько столь разных переводов со словами *исследования, предотвращение, информация, разведка и предупреждение*. Приведенный ниже терминологический анализ концепции позволяет предложить еще один вариант перевода — ВОЗ-центр *компетенций* по пандемиям и эпидемиям.

Цель статьи состоит в том, чтобы (1) провести анализ основных концептуальных положений создания ВОЗ-центра и (2) предложить трактовку отдельных ключевых терминов концепции и их русскоязычные переводные эквиваленты, соответствующие ее общему смыслу.

2 Терминологический анализ

Термин intelligence на 16 страницах концепции встречается 74 раза, включая словосочетания artificial intelligence, intelligence approaches, intelligence solutions, intelligence ecosystem и collaborative in-

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

²Приводится авторский перевод названия.

Количество словоупотреблений ключевых терминов концепции

Термин концепции	Количество словоупотреблений
intelligence	74
data	56
information	20
knowledge	5
context (contextual, contextualized)	7
insight	17

telligence, что почти в 3 раза чаще, чем слова information и knowledge вместе взятые. Понимание основных положений концепции во многом будет обусловлено смысловым содержанием понятий, обозначенных словом intelligence, другими ее ключевыми словами, перечисленными в таблице, а также словосочетаниями с ними.

Согласно таблице, при описании концепции используются такие традиционные англоязычные термины информатики, как data, information и knowledge в словосочетаниях knowledge sharing, knowledge representation, knowledge exchange и knowledge generation. Для понимания этой концепции как основы создания ВОЗ-центра, аналогичных национальных и региональных информационных центров необходимо определить контекстные значения еще и таких англоязычных терминов, как intelligence, context и insight.

Одно из широко распространенных значений термина «context» в гуманитарных науках достаточно полно передано дефиницией в Лингвистическом энциклопедическом словаре: контекст — это «фрагмент текста, включающий избранную для анализа единицу, необходимый и достаточный для определения значения этой единицы, являющегося непротиворечивым по отношению к *общему смыслу текста* (курсив мой. — И. З.)» [8]. Слово «context» используется в концепции в другом значении: *обстановка, окружение, обстоятельства, условия или процессы*, которые оказали влияние на формирование данных и/или информации. Для передачи этого значения в переводах положений концепции слово «контекст» не будет использоваться. Оно резервируется только для описания значений ключевых ее терминов, которые будут определяться на основе результатов терминологического анализа их *контекстов* и общего смысла концепции.

Начнем с термина intelligence, который встречается в 74 контекстах. Приведем переводы двух положений концепции¹, указывая страницы согласно [2].

¹Приводится авторский перевод на русский язык этого и последующих положений.

I. С. 2: “We need the capability to analyse and interpret data so that they become useful information, and we need to understand the context of that information to turn it into the intelligence that policy- and decision-makers need for action.”

‘Мы должны быть способны анализировать и интерпретировать *данные* таким образом, чтобы они становились полезной *информацией*, и нам надо понимать *условия* формирования этой *информации*, чтобы превратить ее в *компетенции*, необходимые для действий политикам и лицам, принимающим решения’.

В этом положении при переводе термина intelligence можно было бы использовать и слово «знания». Однако в следующем положении концепции термины intelligence и knowledge будут присутствовать в разных значениях. Поэтому его контекст не дает возможности использовать здесь слово «знания» при переводе intelligence. Отметим, что термин «context» здесь переведен как *условия* формирования.

II. С. 7: “. . . the WHO Hub will develop knowledge-exchange programmes that model its inclusive and multidisciplinary approach to collaborative intelligence and are specifically tailored to bridge the gap between knowledge generation and pandemic and epidemic intelligence decision-making.”

‘. . . ВОЗ-центр разработает программы обмена *знаниями*, которые станут основой всеобъемлющего и междисциплинарного подхода к формированию коллективных *компетенций* и преодоления разрыва между накоплением *знаний* и принятием решений на основе *компетенций* в области пандемий и эпидемий’.

Приведенное положение говорит, с одной стороны, об отличающихся значениях терминов «knowledge» и «intelligence» в концепции, что требует двух разных русских переводных эквивалентов (в статье предлагается перевести «intelligence» как *компетенции*), с другой стороны — о наличии разрыва между *накоплением знаний* и *принятием решений на основе компетенций*, а также о необходимости разработки специального подхода для его преодоления. Один из возможных подходов — это накопление знания в процессе его генерации, ориентированного на достижение заданной цели, получивший название *целенаправленная генерация знаний* [9–12].

Термин insight встречается в 17 контекстах. Приведем переводы двух положений, указывая страницы согласно [2].

III. С. 2: “Existing disease surveillance systems are mostly limited to health data. Those data are increas-

ingly fragmented, making it difficult to connect them using existing systems and approaches. Surveillance data provide limited insight into the context from which the data are derived, which limits our understanding and ability to take effective action.”

‘Существующие системы мониторинга заболеваний в основном ограничены *данными* о состоянии здоровья. Эти *данные* становятся все более фрагментированными и ненормализованными, что затрудняет их интеграцию с использованием существующих систем и подходов. *Данные*, полученные в результате мониторинга, дают ограниченное *представление* о тех *условиях*, в которых они были получены, что ограничивает наше понимание и способность принимать эффективные меры’.

В приведенном положении предлагается использовать слово «представление» как переводной эквивалент для «insight» в этом контексте.

IV. С. 3: “Pandemic and epidemic intelligence is a core function of public health to generate actionable insights for decision-making to protect and improve the health of populations.”

‘Основная миссия системы здравоохранения в области пандемий и эпидемий состоит в развитии *компетенций* в интересах создания *представлений*, имеющих большое практическое значение для принятия решений по защите и улучшению здоровья населения’.

Из положений I, II и IV можно извлечь следующую последовательность технологических трансформаций¹ в концепции ВОЗ-центра: в результате анализа и интерпретации *данных* формируется полезная *информация*, а на ее основе и в процессе обмена *знаниями* создаются коллективные *компетенции* в интересах создания *представлений*, необходимых лицам, принимающим решения.

3 Технологические трансформации

Технологические трансформации как основной объект предметной области информатики согласно [13; 14; 15, с. 8; 16] рассмотрим в парадигме ее сред, изложенной в работах [17–21]. Это даст возможность предложить распределение пяти базовых сущностей концепции (*данных, информации, знания, компетенций и представлений*) по ментальной, информационной, цифровой средам информатики² и, соответственно, позиционировать технологические трансформации этих сущностей в средах

или на границах между этими тремя средами (см. рисунок).

Предлагается следующее распределение пяти базовых сущностей и их компьютерных кодов по трем средам:

- (1) ментальная среда (*знание* экспертов, их *компетенции* и *представления*; ментальные образы данных);
- (2) информационная среда (*информация* как отчужденная форма представления знания или смысла, компетенций и представлений; сенсорно-воспринимаемые человеком *данные*);
- (3) цифровая среда (компьютерные коды информации, знания, компетенций и представлений; цифровая информация и цифровые данные).

Объекты каждой из трех сред, приведенные в скобках, распадаются на два класса, что графически показано точкой с запятой. Такое деление основано на дихотомии источников происхождения (генерации) этих объектов [22]:

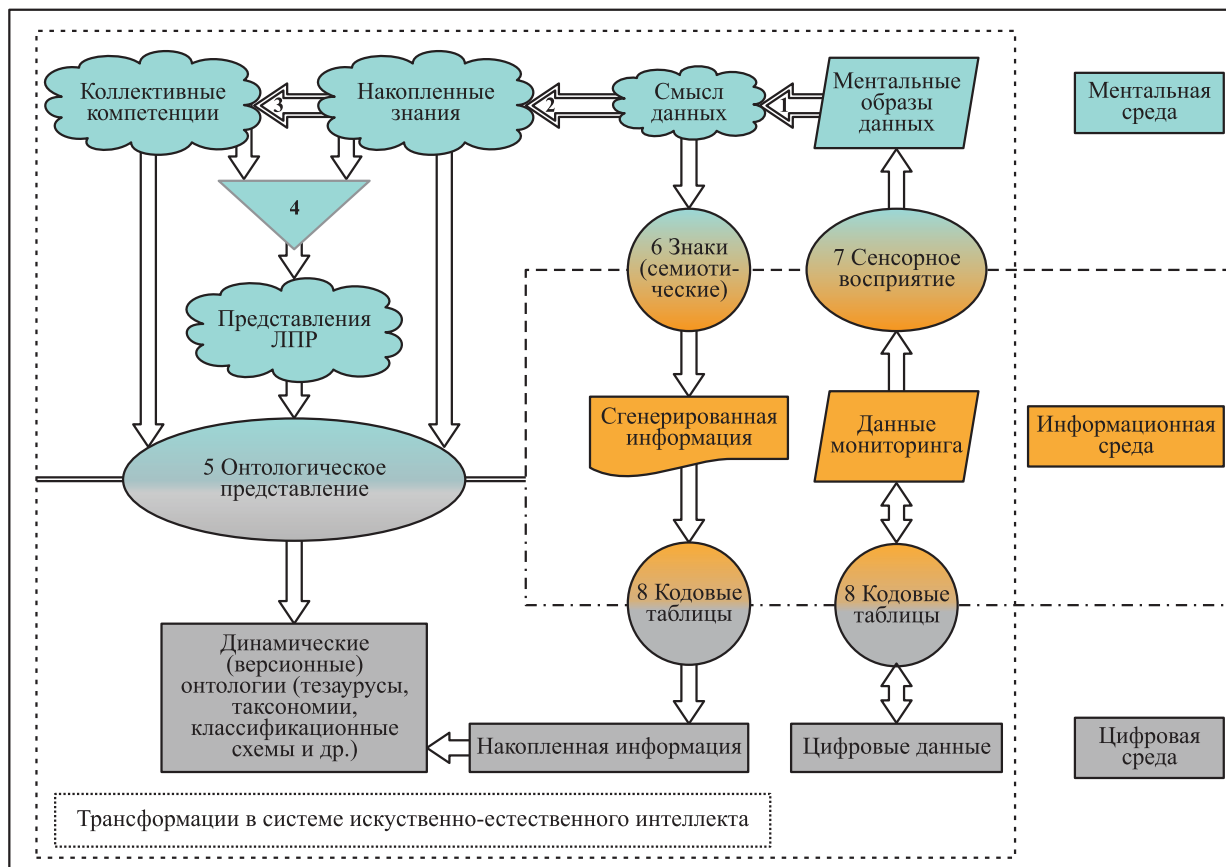
- человек как генератор семантической (знаковой) *информации*;
- материальная сфера как источник сенсорно-воспринимаемых человеком *данных* и технические системы как генераторы *цифровых данных*.

Существенная особенность используемой парадигмы информатики в том, что каждая из трех сред представляется как замкнутая, т. е. ее сущности вне зависимости от класса не могут пересекать границу с соседней средой и не может быть сущностей, принадлежащих одновременно двум или более средам. В этой парадигме технологические трансформации пяти базовых сущностей могут иметь место как на границах между средами (обозначены тремя кругами и двумя овалами), так и внутри них (обозначены одним треугольником с цифрой «4» и тремя стрелками с двойным контуром и цифрами «1», «2» и «3») (см. рисунок).

Данные мониторинга служат одним из основных источников генерации остальных четырех базовых сущностей. С одной стороны, они оцифровываются для хранения в цифровой среде (эта их трансформация обозначена правым кругом «8 Кодовые таблицы»). С другой стороны, они подлежат концептуализации, т. е. извлечению из них смысла (обозначено стрелкой с двойным контуром и цифрой «1»). Перед началом концептуализации данные порождают их ментальные образы в головах экс-

¹Используемые в работах [13; 14; 15, с. 8; 16] словосочетания «информационные трансформации», «процессы информационных трансформаций», «трансформации представлений» и «трансформации контента» при описании основного объекта предметной области информатики как компьютеринга считаются синонимами термина «технологические трансформации», используемого в статье.

²Из пяти сред информатики (ментальной, информационной, цифровой, ДНК- и нейросреды) технологические трансформации рассматриваются в статье только в первых трех средах. Их рассмотрение во всех пяти средах не ставится целью данной статьи.



Технологические трансформации пяти базовых сущностей концепции

пертов (обозначено овалом «7 Сенсорное восприятие»).

На основе смыслового содержания данных генерируется информация о результатах мониторинга (обозначено кругом «6 Знаки (семиотические)»), которая оцифровывается (левый круг «8 Кодовые таблицы») и объединяется в цифровой среде с информацией, извлеченной из других источников (статьи, патенты, отчеты о результатах исследований и др., которые на рисунке не показаны).

Одновременно смысловое содержание данных интегрируется с уже имеющимся знанием в предметной области ВОЗ-центра (стрелка с двойным контуром и цифрой «2»). Накопление знаний и обмен ими служат основой формирования коллективных компетенций (стрелка с двойным контуром и цифрой «3»). Интеграция накопленных знаний и коллективных компетенций служит источником генерации представлений, необходимых лицам, принимающим решения (ЛПР) в предметной области ВОЗ-центра (треугольник с цифрой 4). Накопленное знание, коллективные компетенции и представления ЛПР с учетом их изменений во времени служат основой создания динамических

классификационных схем [23–25], тезаурусов, таксономий и других видов онтологий [26]. Последняя трансформация обозначена овалом «5 Онтологическое представление». Отметим, что в концепции заявлена необходимость использования целенаправленно формируемых таксономий и онтологий [2, с. 10].

В заключение этого раздела зафиксируем, что позиционирование пяти базовых сущностей концепции на основе парадигмы сред предметной области информатики позволяет выделить восемь видов трансформаций в трех средах и на границах между ними, из которых только две последние генерируют коды цифровой среды:

- (1) порождение ментальных образов данных в процессе их сенсорного восприятия;
- (2) концептуализация, т. е. извлечение смысла из данных;
- (3) интеграция извлеченного из данных смыслового содержания с уже имеющимся знанием;
- (4) формирование коллективных компетенций (intelligence);

- (5) генерация представлений, необходимых ЛПР (insights);
- (6) знаковое представление смыслового содержания данных в информационной среде;
- (7) онтологическое представление в *цифровой среде* накопленного знания, коллективных компетенций и представлений ЛПР с учетом их изменений во времени;
- (8) кодирование данных и знаковой информации в *цифровой среде*.

Приведенный перечень трансформаций говорит о том, что реализация этой концепции, скорее всего, предполагает создание автоматизированной системы искусственно-естественного интеллекта [27], так как в концепции говорится, что обмен знаниями будет способствовать эффективному гибриднему принятию решений на основе симбиоза искусственного и естественного интеллекта [2, с. 5].

4 Заключение

Приведенный терминологический анализ концепции является авторским и, конечно, не претендует на полноту. Например, за рамками статьи остался целый ряд словосочетаний со словами *data, information, knowledge, intelligence, context* и *insight*, значения которых в концепции заслуживают отдельного рассмотрения. Кроме того, из пяти сред информатики (ментальной, информационной, цифровой, ДНК- и нейросреды) технологические трансформации были рассмотрены только в первых трех средах. Включение в рассмотрение ДНК-среды расширило бы список технологических трансформаций, добавив в базовые сущности *биоинформационные последовательности*, полученные в процессе секвенирования генома вирусов. Это дало бы возможность включить данные о мутациях вирусов и информацию об их последствиях в общую схему технологических трансформаций базовых сущностей концепции.

Литература

1. *Хачатрян К.* ВОЗ открыла в Берлине Центр предупреждения пандемий. <https://ru.euronews.com/2021/09/01/hub-for-pandemic>.
2. WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence. Strategy Paper. 16 p. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/2021-dha-docs/who_hub.pdf?sfvrsn=8dc28ab6_5.
3. Всемирная организация здравоохранения основала центр исследований пандемий // BNN, 2021. <https://bnn-news.ru/vsemirnaya-organizaciya-zdravoohraneniya-osnovala-czentr-issledovaniy-pandemij-252987>.
4. Центр по предотвращению будущих пандемий открылся в Берлине // НСН, 2021. <https://nsn.fm/in-the-world/tsentr-po-predotvrascheniu-buduschih-pandemii-otkrylsya-v-berline>.
5. ВОЗ открыла в Берлине Центр по предотвращению будущих пандемий // Интерфакс, 2021. <https://www.interfax.ru/world/788001>.
6. ВОЗ открыла в Берлине Центр по пандемической и эпидемической разведке // ИА Красная Весна, 2021. <https://rossaprimavera.ru/news/cdf75c9f>.
7. Берлин становится глобальным центром борьбы с пандемиями // Aussiedlerbote, 2021. <https://aussiedlerbote.de/2021/09/berlin-stanovitsya-globalnym-centrom-borby-s-pandemiyami>.
8. Лингвистический энциклопедический словарь / Под ред. В. Н. Ярцевой. — М.: Советская энциклопедия, 1990. 685 с.
9. *Зацман И. М.* Стадии целенаправленного извлечения знаний, имплицитированных в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 3. С. 175–188.
10. *Зацман И. М.* Целенаправленное развитие систем лингвистических знаний: выявление и заполнение лакун // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 1. С. 91–98.
11. *Zatsman I.* Finding and filling lacunas in linguistic typologies // 15th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings. — Matera, Italy: Institute of Knowledge Asset Management, 2020. P. 780–793.
12. *Zatsman I.* A model of goal-oriented knowledge discovery based on human–computer symbiosis // 16th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings. — Rome, Italy: Arts for Business Institute, 2021. P. 297–312.
13. *Denning P., Rosenbloom P.* Computing: The fourth great domain of science // Commun. ACM, 2009. Vol. 52. No. 9. P. 27–29.
14. *Denning P., Freeman P.* Computing’s paradigm // Commun. ACM, 2009. Vol. 52. No. 12. P. 28–30.
15. *Rosenbloom P.* On computing: The fourth great scientific domain. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2013. 307 p.
16. *Зацман И. М.* Методология обратимой генерализации в контексте классификации информационных трансформаций // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 2. С. 128–144.
17. *Зацман И. М.* Построение системы терминов информационно-компьютерной науки: проблемно-ориентированный подход // Теория и практика общественной научной информации, 2013. Вып. 21. С. 120–159.
18. *Зацман И. М.* Таблица интерфейсов информатики как информационно-компьютерной науки // Научно-техническая информация. Сер. I: Организация и методика информационной работы, 2014. № 11. С. 1–15.
19. *Зацман И. М.* Процессы целенаправленной генерации и развития кросс-языковых экспертных знаний: семиотические основания моделирования // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 3. С. 106–123.

20. Зацман И. М. Интерфейсы третьего порядка в информатике // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 3. С. 82–89.
21. Зацман И. М. Кодирование концептов в цифровой среде // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 4. С. 97–106.
22. Шемакин Ю. И., Романов А. А. Компьютерная семантика. — М.: Школа Китайгородской, 1995. 344 с.
23. Гончаров А. А., Зацман И. М., Кружков М. Г. Темпоральные данные в лексикографических базах знаний // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 4. С. 90–96.
24. Гончаров А. А., Зацман И. М., Кружков М. Г. Эволюция классификаций в надкорпусных базах данных // Информатика и её применения, 2020. Т. 14. Вып. 4. С. 108–116.
25. Гончаров А. А., Зацман И. М., Кружков М. Г. Представление новых лексикографических знаний в динамических классификационных системах // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 1. С. 86–93.
26. McGuinness D. L. Ontologies come of age // Spinning the Semantic Web: Bringing the World Wide Web to its full potential / Eds. D. Fensel, J. Hendler, H. Lieberman, W. Wahlster. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2003. P. 171–194.
27. Зацман И. М. Проблемно-ориентированная актуализация словарных статей двуязычных словарей и медицинской терминологии: сопоставительный анализ // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 1. С. 94–101.

Поступила в редакцию 15.10.21

THE CONCEPTION OF CREATING WHO HUB FOR PANDEMIC AND EPIDEMIC INTELLIGENCE: KEYWORDS AND THEIR TERMINOLOGICAL ANALYSIS

I. M. Zatsman

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

Abstract: The conception of the computerized system which is being created on the initiative of the World Health Organization (WHO) and called WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence is considered. In the description of the conception, words “data,” “information,” and “knowledge” are used (in keywords “knowledge sharing,” “knowledge representation,” “knowledge exchange,” and “knowledge generation”). The understanding of this conception as the basis for the creation of the WHO Hub will largely be determined by their interpretation corresponding to its contextual meaning. The need to create such systems at the national, regional, and global levels was justified in May 2021 in the report of the International Commission of Experts established by WHO, which gives relevance to the analysis of the system of terms of the conception not only for the creation of the WHO Hub. The main aim of the paper is to analyze the principal conceptual statements of WHO Hub creation and to propose an interpretation of their keywords and their Russian-language translation equivalents corresponding to its contextual meaning. At the same time, it is shown that in order to understand this conception, it is also necessary to find out the meanings of such English-language terms as “intelligence,” “context,” and “insight.” In the case of translation of the conception into Russian, it is also necessary to find their Russian-language translation equivalents according to the contexts of their use.

Keywords: intelligence; data; information; knowledge; concept; context; insight; terminological analysis; informatics media

DOI: 10.14357/19922264210414

References

1. Khachatryan, K. VOZ otkryla v Berline Tsentru preduprezhdeniya pandemii [WHO has opened the WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence in Berlin]. Available at: <https://ru.euronews.com/2021/09/01/hub-for-pandemic> (accessed November 18, 2021).
2. WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence. Strategy Paper. 16 p. Available at: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/2021-dha-docs/who_hub.pdf?sfvrsn=8dc28ab6_5 (accessed November 18, 2021).
3. Vsemirnaya organizatsiya zdavookhraneniya osnovala tsestr issledovaniy pandemii [The World Health Organization has established the WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence]. 2021. Available at: <https://bnn-news.ru/vsemirnaya-organizatsiya-zdavookhraneniya-osnovala-csestr-issledovaniy-pandemii-252987> (accessed November 18, 2021).
4. Tsestr po predotvrashcheniyu budushchikh pandemii otkrylsya v Berline [The WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence opened in Berlin]. 2021. NSN. Available at: <https://nsn.fm/in-the-world/tsestr>

- po-predotvrascheniu-buduschih-pandemii-otkrylsya-v-berline (accessed November 18, 2021).
5. VOZ otkryla v Berline Tsentr po predotvrashcheniyu budushchikh pandemiy [WHO has opened the WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence in Berlin]. 2021. *Interfax*. Available at: <https://www.interfax.ru/world/788001> (accessed November 18, 2021).
 6. VOZ otkryla v Berline Tsentr po pandemicheskoy i epidemicheskoy razvedke [WHO has opened the WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence in Berlin]. 2021. *Red Spring News Agency*. Available at: <https://rossaprimavera.ru/news/cdf75c9f> (accessed November 18, 2021).
 7. Berlin stanovitsya global'nym tsentrom bor'by s pandemiymi [Berlin is becoming a global center for combating pandemics]. 2021. *Aussiedlerbote*. Available at: <https://aussiedlerbote.de/2021/09/berlin-stanovitsya-globalnym-centrom-borby-s-pandemiymi/> (accessed November 18, 2021).
 8. Yartseva, V.N., ed. 1990. *Lingvisticheskiy entsiklopedicheskiy slovar'* [Linguistic encyclopedic dictionary]. Moscow: Soviet Encyclopedia. 685 p.
 9. Zatsman, I. 2018. Stadii tselenapravlenno go izvlecheniya znaniy, implitsirovannykh v parallel'nykh tekstakh [Stages of goal-oriented discovery of knowledge implied in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(3):175–188.
 10. Zatsman, I. 2019. Tselenapravlennoe razvitie sistem lingvisticheskikh znaniy: vyyavlenie i zapolnenie lakun [Goal-oriented development of linguistic knowledge systems: Identifying and filling of lacunae]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(1):91–98.
 11. Zatsman, I. 2020. Finding and filling lacunas in linguistic typologies. *15th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings*. Matera, Italy: Institute of Knowledge Asset Management. 780–793.
 12. Zatsman, I. 2021. A model of goal-oriented knowledge discovery based on human–computer symbiosis. *16th Forum (International) on Knowledge Asset Dynamics Proceedings*. Rome, Italy: Arts for Business Institute. 297–312.
 13. Denning, P., and P. Rosenbloom. 2009. Computing: The fourth great domain of science. *Commun. ACM* 52(9):27–29.
 14. Denning, P., and P. Freeman. 2009. Computing's paradigm. *Commun. ACM* 52(12):28–30.
 15. Rosenbloom, P.S. 2013. *On computing: The fourth great scientific domain*. Cambridge, MA: MIT Press. 307 p.
 16. Zatsman, I. 2018. Metodologiya obratimoy generalizatsii v kontekste klassifikatsii informatsionnykh transformatsiy [Methodology of reversible generalization in context of classification of information transformations]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(2):128–144.
 17. Zatsman, I. 2013. Postroenie sistemy terminov informatsionno-komp'yuternoy nauki: problemno-orientirovanny podkhod [Construction of the system of terms of information and computer science: A problem-oriented approach]. *Teoriya i praktika obshchestvennoy nauchnoy informatsii* [Theory and practice of scientific information for social sciences] 21:120–159.
 18. Zatsman, I. 2014. Table of interfaces of informatics as computer and information science. *Scientific Technical Information Processing* 41(4):233–246.
 19. Zatsman, I. 2015. Protsessy tselenapravlennoy generatsii i razvitiya kross-yazykovykh ekspertnykh znaniy: semioticheskie osnovaniya modelirovaniya [Goal-oriented processes of cross-lingual expert knowledge creation: Semiotic foundations for modeling]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(3):106–123.
 20. 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.
 21. Zatsman, I. M. 2019. Kodirovanie kontseptov v tsifrovoy srede [Digital encoding of concepts]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(4):97–106.
 22. Shemakin, Yu. I., and A. A. Romanov. 1995. *Komp'yuternaya semantika* [Computer semantics]. Moscow: Shkola Kitaygorodskoy. 344 p.
 23. Goncharov, A. A., I. M. Zatsman, and M. G. Kruzhkov. 2019. Temporal'nye dannye v leksikograficheskikh bazakh znaniy [Temporal data in lexicographic databases]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(4):90–96.
 24. Goncharov, A. A., I. M. Zatsman, and M. G. Kruzhkov. 2020. Evolyutsiya klassifikatsiy v nadkorpornykh bazakh dannyykh [Evolution of classifications in supracorpora databases]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 14(4):108–116.
 25. Goncharov, A. A., I. M. Zatsman, and M. G. Kruzhkov. 2021. Predstavlenie novykh leksikograficheskikh znaniy v dinamicheskikh klassifikatsionnykh sistemakh [Representation of new lexicographical knowledge in dynamic classification systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 15(1):86–93.
 26. McGuinness, D. L. 2003. Ontologies come of age. *Spinning the Semantic Web: Bringing the World Wide Web to its full potential*. Eds. D. Fensel, J. Hendler, H. Lieberman, and W. Wahlster. Cambridge, MA: MIT Press. 171–194.
 27. Zatsman, I. 2021. Problemno-orientirovannaya aktualizatsiya slovarnykh statey dvuyazychnykh slovarey i meditsinskoy terminologii: sopolstavitel'nyy analiz [Problem-oriented updating of dictionary entries of bilingual dictionaries and medical terminology: Comparative analysis]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 15(1):94–101.

Received October 15, 2021

Contributor

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

АНТРОПОГЕННАЯ «ТРЕТЬЯ» ПРИРОДА: ОТНОСИТЕЛЬНО АВТОНОМНЫЙ СТАТУС ЕЕ ИСКУССТВЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СУБЪЕКТОВ

С. Н. Гринченко¹

Аннотация: С позиций информатико-кибернетического моделирования процесса развития самоуправляющейся иерархосетевой системы Человечества рассмотрена антропогенная «третья» природа, в которой с середины XX в. начала формироваться важная часть с элементами части «первой» (неживой) природы, получившими возможность относительно самостоятельно принимать решения (иерархический искусственный интеллект (ИИИ)) и активно действовать (интеллектуальные роботы), т. е. функционировать в некоторой степени независимо от создавшего их человека. Для этой части второй природы предлагается наименование «третья» природа. Ее формирование стало возможным с возникновением базисных информационных технологий (БИТ) — локальных компьютеров с ~ 1946 г. и телекоммуникаций/сетей с ~ 1979 г. Приводятся типичные пространственные и временные параметры иерархосетевой системы Человечества (результаты модельного расчета). Отмечается, что в активной деятельности элементов третьей природы — существенно автономных составляющих ИИИ и интеллектуальных роботов — заключается экзистенциальная (гуманитарная!) опасность для Человечества.

Ключевые слова: вторая природа; третья природа; информатико-кибернетическая модель; самоуправляющаяся иерархосетевая система Человечества; информационные технологии; иерархический искусственный интеллект; интеллектуальные роботы

DOI: 10.14357/19922264210415

1 Введение. Уточнение терминологии

Общепринято под *природой* подразумевать совокупность всего сущего, мир в целом. При этом в природе выделяют две основные составляющие: объективно существующий и независимый от человека мир и ту часть окружающего мира, которая создается человеческой деятельностью, — техникой, искусством, культурой и т. п. [1]. Вторую часть так порой и называют — «второй» природой (см., например, [2]). Исходя из этого, и первую часть целесообразно называть «первой» природой.

В свою очередь, в последние десятилетия с возникновением компьютеров и телекоммуникаций в недрах антропогенной второй природы начала формироваться важная ее часть, элементы которой получили возможность относительно самостоятельно принимать решения (искусственный интеллект) и активно действовать (интеллектуальные роботы) — в той или иной степени независимо от создавшего их человека. При этом аппаратная часть этих элементов явно относится к неживой — первой — природе. Следовательно, для этой суперпозиции первой и второй природы — и при этом

продукта жизнедеятельности человека — напрашивается наименование «*третья*» природа.

2 Взаимодействие человека, общества и природы — первой, второй и третьей

Таким образом, вторая природа разделяется на две составляющие: собственно «вторую», или *антропогенную пассивную*, природу и действующую относительно автономно от человека «третью», *антропогенную активную*, природу. Процессы этого активного функционирования третьей природы (происходящие на наших глазах) совершаются либо по задаваемым человеком априори регулярным (детерминированным) компьютерным алгоритмам, либо по случайно-регулярным алгоритмам, которые искусственный интеллект может изменять и развивать автоматически.

Формирование на фоне первой природы второй и далее — третьей природы описывается в терминах этапов глобально-космической эволюции самоуправляющейся иерархосетевой системы Человечества, т. е. *коэволюции* таких его составляющих,

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

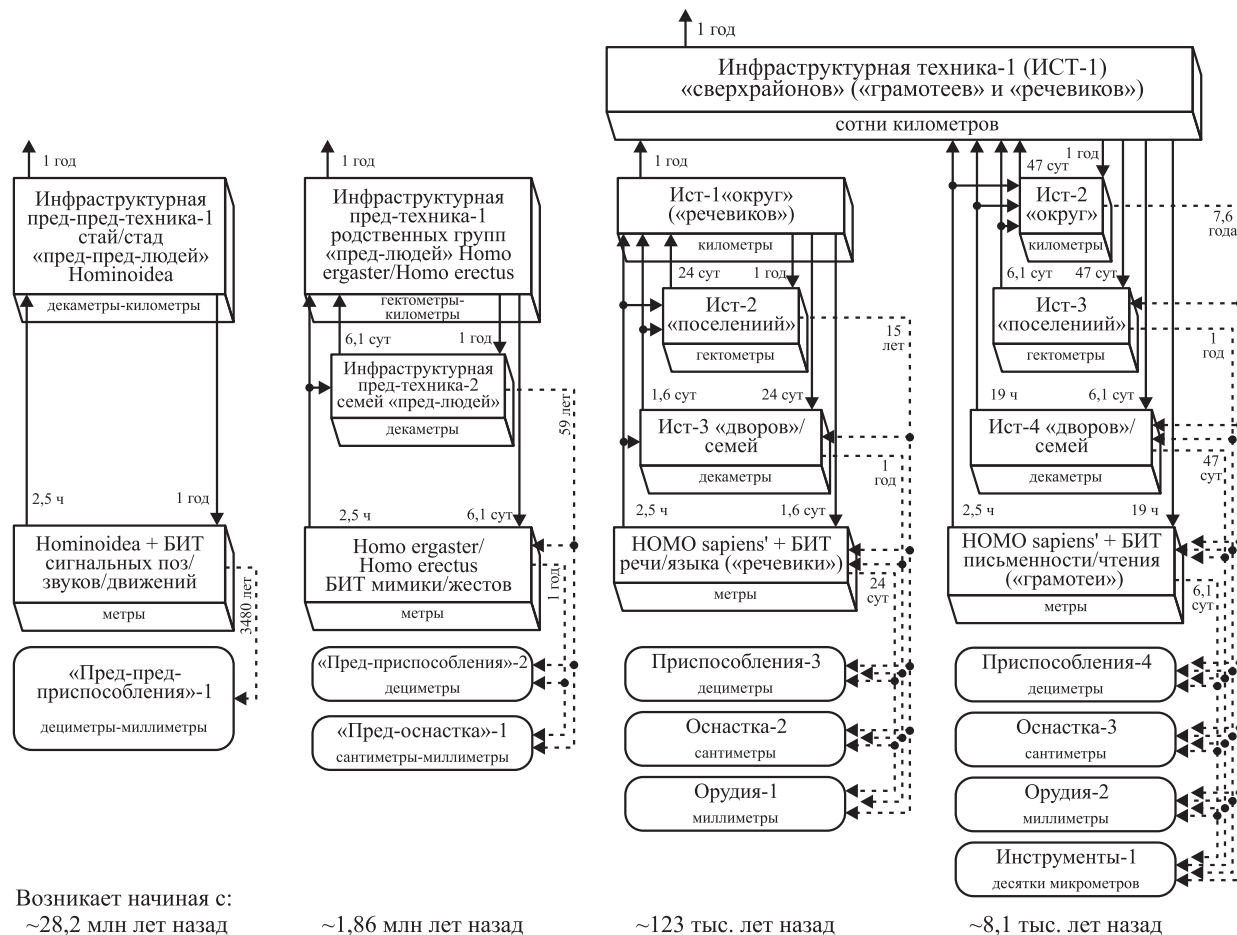


Рис. 1 Подсистема формирующейся самоуправляющейся иерархосетевой системы Человечества (период с 28,2 млн до 8,1 тыс. лет назад)

как антросфера, психосфера, когнитосфера, социосфера, техносфера, ноосфера и т. п., в коэволюции с иерархической системой биосферы. Согласно информатико-кибернетической модели (ИКМ) системы Человечества, критическими точками этих процессов являются системные перевороты в истории Человечества [3–8]. Их маркерами выступают соответствующие информационные перевороты, т. е. старты новых базисных информационных технологий, с модельными расчетными датировками ~ 28 230–1860–123–8,1 тыс. лет назад–1446–1946–1979–1981–1981 гг. ...¹

При этом каждый системный переворот и маркирующая его БИТ инициируют появление двойки совокупностей иерархических уровней/ярусов в составе: (1) восходящей, выше яруса личности, иерархии социально-производственно-инфраструктурных технологий (формирования сообществ/социумов людей и инфраструктурных образований второй

и третьей природы на все больших территориях) и (2) нисходящей, ниже яруса личности, иерархии производственно-микроструктурных технологий (создания все более прецизионных инструментариев и формирования с их помощью все более «тонких» объектов второй и третьей природы) (рис. 1 и 2).

На рис. 1 и 2 восходящие стрелки, имеющие структуру «многие – к одному», отражают поисковую активность представителей соответствующих ярусов в иерархии; нисходящие сплошные стрелки, имеющие структуру «один – ко многим», отражают целевые критерии поисковой оптимизации системной энергетики – экстремальные, при ограничениях типа равенств и неравенств; нисходящие пунктирные стрелки, имеющие структуру «один – ко многим», отражают системную память личностно-производственно-социального – результат адаптивных влияний представителей вышележащих ие-

¹ Временные и пространственные количественные параметры ИКМ базируются на геометрической прогрессии со знаменателем $e^e = 15,15426 \dots$, выявленной А. В. Жирмунским и В. И. Кузьминым при исследовании критических уровней в развитии биосистем [9].

рархических ярусов на структуру и поведение вложенных в них нижележащих; для каждой из них приведены характерные времена изменения (средние периоды колебания или релаксации); ИСТ — инфраструктурные технологии.

Согласно ИКМ, начиная с середины XX в. (расчетная модельная дата — 1946 г.) в составе антропогенной второй природы и начала выделяться антропогенная третья природа, т. е. в системе Человечества начали создаваться относительно автономные (в соответствующем смысле) от человека алгоритмы/механизмы («субъекты») ИИИ — искусственного интеллекта, ориентированного на решение задач соответствующего уровня/яруса в системной иерархии [6, 8] — и интеллектуальные роботы.

Активность, присущая этим представителям третьей природы, отражена на схеме рис. 2 посредством перехода структуры ярусов, лежащих в иерархии ниже яруса индивида, от указания на пассивный — в управленческом смысле — субстрат производственно-микроструктурных технологий к активным составляющим полноценных контуров иерархической оптимизации/самоуправления в системе Человечества соответственно.

Предтечами системообразующих начал третьей природы были БИТ письменности/чтения и БИТ тиражирования текстов/книгопечатания, на базе которых рукописи и книги уже стали независимыми от памяти отдельного человека носителями информации и знаний, но еще не получили возможность их автономно генерировать. Перспективная же нано-БИТ обещает новый кардинальный скачок в поведенческой и структурной сложности «цифровой эпохи» развития третьей природы.

3 Заключение

Позиционирование БИТ локальных компьютеров и БИТ телекоммуникаций/сетей в качестве базисных факторов формирования третьей природы — что, собственно, и определяется как «цифровая эпоха» в системном развитии Человечества — демонстрирует их важнейшую роль в широком контексте единой исторической ретроспективы и перспективы — со всеми возможными положительными и отрицательными проявлениями результатов их вклада в такое развитие.

В частности, в некоторой перспективе третья природа может утратить свою изначальную и непреходящую «человеческую» компоненту — практически полностью автоматические заводы по производству «цифровой» техники уже существуют! — и как пойдет ее дальнейшая эволюция, неясно (эта проблема многократно обсуждалась в мировой научной фантастике: «бунт машин», «Голем XIV», «массачусетская машина» и т. д. и т. п.).

Таким образом, пользуясь соответствующими достижениями третьей природы, не следует забывать, что в активности автономной деятельности ее элементов — тем более «нечеловеческих» — заключается экзистенциальная (гуманитарная!) опасность для Человечества.

Литература

1. *Месяц С. В.* Природа // Большая российская энциклопедия. — М.: Большая российская энциклопедия, 2015. Т. 27. С. 519–520.
2. *Королев В. К.* Вторая природа // Культурология: Краткий тематический словарь. — Ростов н/Д: Феникс, 2001. 192 с.
3. *Гринченко С. Н.* Системная память живого (как основа его метаэволюции и периодической структуры). — М.: ИПИ РАН, Мир, 2004. 512 с.
4. *Гринченко С. Н.* Метаэволюция (систем неживой, живой и социально-технологической природы). — М.: ИПИ РАН, 2007. 456 с.
5. *Щапова Ю. Л., Гринченко С. Н.* Введение в теорию археологической эпохи: числовое моделирование и логарифмические шкалы пространственно-временных координат. — М.: Ист. фак. Моск. ун-та, ФИЦ ИУ РАН, 2017. 236 с.
6. *Гринченко С. Н.* О пространственном структурировании феномена «искусственный интеллект» // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении, 2019. № 4(14). С. 10–16.
7. *Щапова Ю. Л., Гринченко С. Н., Кокорина Ю. Г.* Информатико-кибернетическое и математическое моделирование археологической эпохи: логико-понятийный аппарат. — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2019. 136 с.
8. *Гринченко С. Н.* О системной иерархии искусственного интеллекта // Информатика и её применения, 2021. Вып. 1. С. 111–115.
9. *Жирмунский А. В., Кузьмин В. И.* Критические уровни в процессах развития биологических систем. — М.: Наука, 1982. 179 с.

Поступила в редакцию 23.12.20

ANTHROPOGENIC “THIRD” NATURE: THE RELATIVELY AUTONOMOUS STATUS OF ITS ARTIFICIAL INTELLECTUAL SUBJECTS

S. N. Grinchenko

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

Abstract: From the standpoint of informatics-cybernetic modeling of the development process of the self-controlling hierarchical-network system of Humankind, an anthropogenic “second” nature is considered in which an important part began to form from the middle of the 20th century with elements of the part of the “first” (inanimate) nature that were able relatively independently to make decisions (hierarchical artificial intelligence) and actively act (intelligent robots), i. e., to function somewhat independently of the person who created them. For this part of the second nature, the term “third” nature is proposed. Its formation became possible with the emergence of basic information technologies — local computers since ~ 1946 and telecommunications/networks since ~ 1979. Typical spatial and temporal parameters of the hierarchical-network system of Humankind (the results of a model calculation) are given. It is noted that the activity of the actions of the third nature elements — essentially autonomous components of hierarchical artificial intelligence and intelligent robots — is an existential (humanitarian!) danger for Humankind.

Keywords: second nature; third nature; informatics-cybernetic model; self-controlling hierarchical-network system of Humankind; information technology; hierarchical artificial intelligence; intelligent robots

DOI: 10.14357/19922264210415

References

1. Mesyats, S. V. 2015. Priroda [Nature]. *Bol'shaya russiyskaya entsiklopediya* [Great Russian Encyclopedia]. Moscow: BRE. 27:519–520.
2. Korolev, V. K. 2001. Vtoraya priroda [The second nature]. *Kul'turologiya: Kratkiy tematicheskii slovar'* [Cultural studies: A short subject dictionary]. Rostov-on-Don: Feniks. 192 p.
3. Grinchenko, S. N. 2004. *Sistemnaya pamyat' zhivogo (kak osnova ego metaevolyutsii i periodicheskoy struktury)* [System memory of the life (as the basis of its metaevolution and periodic structure)]. Moscow: IPIRAN, Mir. 512 p.
4. Grinchenko, S. N. 2007. *Metaevolyutsiya (sistem nezhivoy, zhivoy i sotsial'no-tehnologicheskoy prirody)* [Metaevolution (of inanimate, animate, and sociotechnological nature systems)]. Moscow: IPIRAN. 456 p.
5. Shchapova, Y. L., and S. N. Grinchenko. 2017. *Vvedenie v teoriyu arkheologicheskoy epokhi: chislovoe modelirovanie i logarifmicheskie shkaly prostranstvenno-vremennykh koordinat* [Introduction to the theory of the archaeological epoch: Numerical modeling and logarithmic scales of space–time coordinates]. Moscow: Faculty of History MSU, FRC CSCRAS. 236 p.
6. Grinchenko, S. N. 2019. O prostranstvennom strukturovaniy fenomeny “iskusstvennyy intellekt” [On the spatial structuring of the phenomenon of “artificial intelligence”]. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [ITNOU: Information Technologies in Science, Education and Control] 14(4):10–16.
7. Shchapova, Yu. L., S. N. Grinchenko, and Yu. G. Kokorina. 2019. *Informatiko-kiberneticheskoe i matematicheskoe modelirovanie arkheologicheskoy epokhi: logiko-ponyatiynyy apparat* [Informatics-cybernetic and mathematical modeling of the archaeological epoch: Logical-conceptual apparatus]. Moscow: FRC CSC RAS. 136 p.
8. Grinchenko, S. N. 2021. O sistemnoy iyerarkhii iskusstvennogo intellekta [On the system hierarchy of artificial intelligence]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 15(1):111–115.
9. Zhirmunskiy, A. V., and V. I. Kuz'min. 1982. *Kriticheskie urovni v protsessakh razvitiya biologicheskikh sistem* [Critical levels in the development of biological systems]. Moscow: Nauka. 179 p.

Received December 23, 2020

Contributor

Grinchenko Sergey N. (b. 1946) — Doctor of Science in technology, professor, principal scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sgrinchenko@ipiran.ru

ПОПРАВКА К СТАТЬЕ О. В. ШЕСТАКОВА «ПОРОГОВЫЕ
ФУНКЦИИ В МЕТОДАХ ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА,
ОСНОВАННЫХ НА ВЕЙВЛЕТ-РАЗЛОЖЕНИИ СИГНАЛА»
(Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 3. С. 51–56)

DOI: 10.14357/19922264210307

С. 55, вместо

ANALYSIS OF THE UNBIASED MEAN-SQUARE RISK ESTIMATE
OF THE BLOCK THRESHOLDING METHOD

должно быть

THRESHOLDING FUNCTIONS IN THE NOISE SUPPRESSION METHODS
BASED ON THE WAVELET EXPANSION OF THE SIGNAL

ПОПРАВКА К СТАТЬЕ А. А. КУДРЯВЦЕВА, О. В. ШЕСТАКОВА,
С. Я. ШОРГИНА «МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗГИБА,
ФОРМЫ И МАСШТАБА ГАММА-ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ»
(Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 3. С. 57–62)

DOI: 10.14357/19922264210308

С. 61, вместо

PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF BALANCE INDEX OF FACTORS
WITH GENERALIZED GAMMA DISTRIBUTION

должно быть

A METHOD FOR ESTIMATING BENT, SHAPE AND SCALE PARAMETERS
OF THE GAMMA-EXPONENTIAL DISTRIBUTION

Абгарян Каринэ Карленовна (р. 1963) — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; заведующая кафедрой Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Босов Алексей Вячеславович (р. 1969) — доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; профессор кафедры «Теория вероятностей и компьютерное моделирование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Вышинский Леонид Леонидович (р. 1941) — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Гаврилов Евгений Сергеевич (р. 1982) — научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; старший преподаватель Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

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

Гринченко Сергей Николаевич (р. 1946) — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Александр Александрович (р. 1946) — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Николай Александрович (р. 1982) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики 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

Дюкова Елена Всеволодовна (р. 1945) — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Забжайло Михаил Иванович (р. 1956) — доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Зацман Игорь Моисеевич (р. 1952) — доктор технических наук, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Игнатов Алексей Николаевич (р. 1991) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Теория вероятностей и компьютерное моделирование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Инькова Ольга Юрьевна (р. 1965) — доктор филологических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Каменских Антон Николаевич (р. 1991) — кандидат технических наук, доцент Пермского национального исследовательского политехнического университета

Кочеткова Ирина Андреевна (р. 1985) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов; старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского

центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кружков Михаил Григорьевич (р. 1975) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кудрявцев Алексей Андреевич (р. 1978) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник Московского центра фундаментальной и прикладной математики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Куцазли Анна Ивановна (р. 1997) — аспирант кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов

Лощилова Елена Юрьевна (р. 1960) — главный специалист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Малашенко Юрий Евгеньевич (р. 1946) — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Масляков Глеб Олегович (р. 1996) — аспирант Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Назарова Ирина Александровна (р. 1966) — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Наумов Андрей Викторович (р. 1966) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теория вероятностей и компьютерное моделирование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Рождественский Юрий Владимирович (р. 1952) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Севастьянов Леонид Антонович (р. 1949) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов; про-

фессор Объединенного института ядерных исследований

Смирнов Дмитрий Владимирович (р. 1984) — бизнес-партнер по ИТ департамента безопасности ПАО «Сбербанк России»

Соколов Игорь Анатольевич (р. 1954) — доктор технических наук, академик РАН, директор Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

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

Тимонина Елена Евгеньевна (р. 1952) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Флёров Юрий Арсениевич (р. 1942) — член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Харин Петр Александрович (р. 1993) — аспирант кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов

Шестаков Олег Владимирович (р. 1976) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; ведущий научный сотрудник Московского центра фундаментальной и прикладной математики

Шнурков Петр Викторович (р. 1953) — кандидат физико-математических наук, доцент Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

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

Щетинин Евгений Юрьевич (р. 1962) — доктор физико-математических наук, профессор Департамента математики Финансового университета при Правительстве РФ

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2021 г.

	Вып.	Стр.
Абгарян К. К., Гаврилов Е. С. Распределенная информационная система для расчета структурных свойств композиционных материалов	4	50–58
Агаларов Я. М. Оптимальное пороговое управление доступом в системе $M/M/s$ с неоднородными приборами и общим накопителем	1	57–64
Андрианова Е. Г. см. Сигов А. С.		
Арутюнов Е. Н., Кудрявцев А. А., Недоливко Ю. Н. Вероятностные характеристики индекса баланса факторов, имеющих обобщенные гамма-распределения	1	65–71
Базилевский М. П. Метод выпрямления искаженных из-за мультиколлинеарности коэффициентов в регрессионных моделях	2	60–65
Бахтеев О. Ю. см. Гребенькова О. С.		
Бахтеев О. Ю. см. Кузнецова Р. В.		
Борисов А. В., Казанчян Д. Х. Фильтрация состояний марковских скачкообразных процессов по комплексным наблюдениям I: точное решение задачи	2	12–19
Борисов А. В., Казанчян Д. Х. Фильтрация состояний марковских скачкообразных процессов по комплексным наблюдениям II: численный алгоритм	3	9–15
Босов А. В. О некоторых частных случаях в задаче управления выходом стохастической дифференциальной системы по квадратичному критерию	1	11–17
Босов А. В. Управление линейным выходом марковской цепи по квадратичному критерию	2	3–11
Босов А. В., Жуков Д. В. Экспертная система для мониторинга и прогнозирования процессов распределения ресурсов	3	29–40
Босов А. В., Игнатов А. Н., Наумов А. В. Алгоритмы приближенного решения задачи назначения «технологического окна» на участках железнодорожной сети	4	3–11
Брюхов Д. О., Ступников С. А., Ковалёв Д. Ю., Шанин И. А. Архитектура распределенного решения задач анализа данных в области нейрофизиологии	1	78–85
Власкина А. С. см. Кочеткова И. А.		
Ву Н. Н. см. Кочеткова И. А.		
Вышинский Л. Л., Флёров Ю. А. Информационная модель весового облика летательных аппаратов	1	50–56
Вышинский Л. Л., Флёров Ю. А. Теоретические основы формирования весового облика самолета	4	93–102
Гаврилов Е. С. см. Абгарян К. К.		
Гончаренко М. Б., Захарова Т. В. Некоторые свойства смесей нормальных распределений и их приложения к задачам магнитоэнцефалографии	2	44–51
Гончаров А. А., Зацман И. М. Принципы структуризации статей в электронных словарях	2	89–95
Гончаров А. А., Зацман И. М., Кружков М. Г. Представление новых лексикографических знаний в динамических классификационных системах	1	86–93
Гончаров А. А., Зацман И. М., Кружков М. Г., Лощилова Е. Ю. Отражение эволюции лексикографических знаний в динамических классификационных системах	4	41–49
Гончаров А. А., Инькова О. Ю. Извлечение знаний о средствах выражения логико-семантических отношений при помощи надкорпусной базы данных	2	96–103
Горшенин А. К., Кузьмин В. Ю. Метод повышения точности нейросетевых прогнозов с использованием смешанных вероятностных моделей и его реализация в виде цифрового сервиса	3	63–74
Гребенькова О. С., Бахтеев О. Ю., Стрижов В. В. Вариационная оптимизация модели глубокого обучения с контролем сложности	1	42–49

	Вып.	Стр.
Гринченко С. Н. Антропогенная «третья» природа: относительно автономный статус ее искусственных интеллектуальных субъектов	4	110–114
Гринченко С. Н. О системной иерархии искусственного интеллекта	1	111–115
Грушо А. А., Грушо Н. А., Забежайло М. И., Смирнов Д. В., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я. Статистика и кластеры в поисках аномальных вкраплений в условиях больших данных	4	79–86
Грушо А. А., Грушо Н. А., Забежайло М. И., Тимонина Е. Е. Удаленный мониторинг рабочих процессов	3	2–8
Грушо А. А., Забежайло М. И., Смирнов Д. В., Тимонина Е. Е. Интеллектуальный анализ пополняемых коллекций Big Data в режиме процессно-реального времени	2	36–40
Грушо Н. А. см. Грушо А. А.		
Грушо Н. А. см. Грушо А. А.		
Дараселия А. В., Сопин Э. С., Молчанов Д. А., Самуйлов К. Е. Анализ стратегии разгрузки базовых станций 5G NR с помощью технологии NR-U	3	98–111
Дорофеева А. В. см. Королев В. Ю.		
Дьяченко Ю. Г. см. Соколов И. А.		
Дюкова Е. В., Масляков Г. О. О выборе частичных порядков на множествах значений признаков в задаче классификации	4	72–78
Егорова А. Ю. см. Нуриев В. А.		
Жуков Д. В. см. Босов А. В.		
Жуков Д. О., Хватова Т. Ю., Зальцман А. Д. Моделирование стохастической динамики изменения состояний узлов и перколяционных переходов в социальных сетях с учетом самоорганизации и наличия памяти	1	102–110
Забежайло М. И. см. Грушо А. А.		
Забежайло М. И. см. Грушо А. А.		
Забежайло М. И. см. Грушо А. А.		
Зальцман А. Д. см. Жуков Д. О.		
Захарова Т. В. см. Гончаренко М. Б.		
Зацман И. М. Концепция создания ВОЗ-центра компетенций по пандемиям и эпидемиям: ключевые понятия и их терминологический анализ	4	103–109
Зацман И. М. Проблемно-ориентированная актуализация словарных статей двуязычных словарей и медицинской терминологии: сопоставительный анализ	1	94–101
Зацман И. М. Формы представления нового знания, извлеченного из текстов	3	83–90
Зацман И. М. см. Гончаров А. А.		
Зацман И. М. см. Гончаров А. А.		
Зацман И. М. см. Гончаров А. А.		
Зейфман А. И., Сатин Я. А., Ковалёв И. А. Об одной нестационарной модели обслуживания с катастрофами и тяжелыми хвостами	2	20–25
Игнатов А. Н. см. Босов А. В.		
Инькова О. Ю., Кружков М. Г. Структурированные определения дискурсивных отношений в надкорпусной базе данных коннекторов	4	27–32
Инькова О. Ю. см. Гончаров А. А.		
Истратов Л. А. см. Сигов А. С.		
Казанчян Д. Х. см. Борисов А. В.		
Казанчян Д. Х. см. Борисов А. В.		
Каменских А. Н. см. Соколов И. А.		
Кириков И. А., Листопад С. В. Согласование целей агентов сплоченных гибридных интеллектуальных многоагентных систем	2	66–71
Кириков И. А. см. Румовская С. Б.		
Ковалёв Д. Ю. см. Брюхов Д. О.		
Ковалёв И. А. см. Зейфман А. И.		
Ковалёв С. П. Методы теории категорий в цифровом проектировании гетерогенных киберфизических систем	1	23–29

	Вып.	Стр.
Коновалов М. Г., Разумчик Р. В. Диспетчеризация в системе с параллельным обслуживанием с помощью распределенного градиентного управления марковской цепью	3	41–50
Королев В. Ю., Дорофеева А. В. О точности нормальной аппроксимации при отсутствии нормальной сходимости	1	116–121
Кочеткова И. А., Власкина А. С., Ву Н. Н., Шоргин В. С. Система массового обслуживания с управляемым по сигналам перераспределением приборов для анализа нарезки ресурсов сети 5G	3	91–97
Кочеткова И. А., Куцазли А. И., Харин П. А., Шоргин С. Я. Модель схемы приоритетного доступа трафика URLLC и eMBB в сети пятого поколения в виде ресурсной системы массового обслуживания	4	87–92
Кривенко М. П. Мягкие вычисления в задачах медицинской диагностики	2	52–59
Кружков М. Г. см. Гончаров А. А.		
Кружков М. Г. см. Гончаров А. А.		
Кружков М. Г. см. Инькова О. Ю.		
Кудрявцев А. А., Шестаков О. В. Минимаксные оценки функции потерь, основанной на интегральных вероятностях ошибок при пороговой обработке вейвлет-коэффициентов	4	12–19
Кудрявцев А. А., Шестаков О. В., Шоргин С. Я. Метод оценивания параметров изгиба, формы и масштаба гамма-экспоненциального распределения	3	57–62
Кудрявцев А. А. см. Арутюнов Е. Н.		
Кузнецова Р. В., Бахтеев О. Ю., Чехович Ю. В. Методы обнаружения переводных заимствований в больших текстовых коллекциях	1	30–41
Кузьмин В. Ю. см. Горшенин А. К.		
Куцазли А. И. см. Кочеткова И. А.		
Липатьев А. А. Неасимптотический анализ статистики Бартлетта–Нанда–Пилая для данных большой размерности	1	72–77
Листопад С. В. см. Кириков И. А.		
Лощилова Е. Ю. см. Гончаров А. А.		
Малашенко Ю. Е. Максимальные межузловые потоки при предельной загрузке многопользовательской сети	3	24–28
Малашенко Ю. Е., Назарова И. А. Анализ распределения предельных нагрузок в многопользовательской сети	4	20–26
Масляков Г. О. см. Дюкова Е. В.		
Молчанов Д. А. см. Дараселия А. В.		
Монахов М. М. Разложения Чебышёва–Эджворта для распределений обобщенных статистик типа Хотеллинга, построенных по выборкам случайного размера	2	72–81
Назарова И. А. см. Малашенко Ю. Е.		
Наумов А. В. см. Босов А. В.		
Недоливко Ю. Н. см. Арутюнов Е. Н.		
Нуриев В. А., Егорова А. Ю. Методы оценки качества машинного перевода: современное состояние	2	104–111
Павлов Ю. Л. Связность конфигурационных графов в моделях сложных сетей	1	18–22
Разумчик Р. В. см. Коновалов М. Г.		
Рождественский Ю. В. см. Соколов И. А.		
Румовская С. Б., Кириков И. А. Метод визуализации стимуляции конфликтов в гибридных интеллектуальных многоагентных системах	3	75–82
Самуйлов К. Е. см. Дараселия А. В.		
Сатин Я. А. см. Зейфман А. И.		
Севастьянов Л. А. см. Щетинин Е. Ю.		
Сигов А. С., Андрианова Е. Г., Истратов Л. А. Стохастическая динамика самоорганизующихся социальных систем с памятью (электоральные процессы)	2	112–121
Синицын И. Н. Нормальные субоптимальные фильтры для дифференциальных стохастических систем, не разрешенных относительно производных	1	3–10

	Вып.	Стр.
Смирнов Д. В. см. Грушо А. А.		
Смирнов Д. В. см. Грушо А. А.		
Соколов И. А., Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Рождественский Ю. В., Каменских А. Н. Базис реализации сбоеустойчивых электронных схем	4	65–71
Сопин Э. С. см. Дараселия А. В.		
Степченков Ю. А. см. Соколов И. А.		
Стрижов В. В. см. Гребенькова О. С.		
Ступников С. А. см. Брюхов Д. О.		
Сушко Д. В. Алгоритмы сжатия данных массивов силовых кривых I: кодирование ошибок предсказания	2	82–88
Сушко Д. В. Алгоритмы сжатия данных массивов силовых кривых II: кодирование компонент вейвлет-преобразования	3	16–23
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.		
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.		
Тимонина Е. Е. см. Грушо А. А.		
Ушаков В. Г., Ушаков Н. Г. Многомерные распределения выходящих потоков в системе с абсолютным приоритетом	2	26–29
Ушаков Н. Г. см. Ушаков В. Г.		
Флёров Ю. А. см. Вышинский Л. Л.		
Флёров Ю. А. см. Вышинский Л. Л.		
Харин П. А. см. Кочеткова И. А.		
Хватова Т. Ю. см. Жуков Д. О.		
Чехович Ю. В. см. Кузнецова Р. В.		
Шанин И. А. см. Брюхов Д. О.		
Шестаков О. В. Анализ несмещенной оценки среднеквадратичного риска метода блочной пороговой обработки	2	30–35
Шестаков О. В. Пороговые функции в методах подавления шума, основанных на вейвлет-разложении сигнала	3	51–56
Шестаков О. В. см. Кудрявцев А. А.		
Шестаков О. В. см. Кудрявцев А. А.		
Шнурков П. В. Создание стохастической динамической односекторной экономической модели с дискретным временем и анализ соответствующей задачи оптимального управления	4	33–40
Шоргин В. С. см. Кочеткова И. А.		
Шоргин С. Я. см. Грушо А. А.		
Шоргин С. Я. см. Кочеткова И. А.		
Шоргин С. Я. см. Кудрявцев А. А.		
Щегинин Е. Ю., Севастьянов Л. А. О методах переноса глубокого обучения в задачах классификации биомедицинских изображений	4	59–64

2021 AUTHOR INDEX

	Issue	Page
Abgaryan K. K. and Gavrilov E. S. Distributed information system for calculating the structural properties of composite materials	4	50–58
Agalarov Ya. M. Optimal threshold-based admission control in the $M/M/s$ system with heterogeneous servers and a common queue	1	57–64
Andrianova E. G. see Sigov A. S.		
Arutyunov E. N., Kudryavtsev A. A., and Nedolivko Iu. N. Probabilistic characteristics of balance index of factors with generalized gamma distribution	1	65–71
Bakhteev O. Yu. see Grebenkova O. S.		
Bakhteev O. Yu. see Kuznetsova R. V.		
Bazilevskiy M. P. Method of straightening distorted due to multicollinearity coefficients in regression models	2	60–65
Borisov A. V. and Kazanchyan D. Kh. Filtering of Markov jump processes given composite observations I: Exact solution	2	12–19
Borisov A. V. and Kazanchyan D. Kh. Filtering of Markov jump processes given composite observations II: Numerical algorithm	3	9–15
Bosov A. V. Linear output control of Markov chains by the quadratic criterion	2	3–11
Bosov A. V. On some special cases in the problem of stochastic differential system output control by the quadratic criterion	1	11–17
Bosov A. V., Ignatov A. N., and Naumov A. V. Algorithms for an approximate solution of the track possession problem on the railway network segment	4	3–11
Bosov A. V. and Zhukov D. V. Expert system for monitoring and forecasting of resource allocation processes	3	29–40
Briukhov D. O., Stupnikov S. A., Kovalev D. Yu., and Shanin I. A. An architecture for distributed data analysis problem solving in neurophysiology	1	78–85
Chekhovich Yu. V. see Kuznetsova R. V.		
Dasaseliya A. V., Sopin E. S., Moltchanov D. A., and Samouylov K. E. Analysis of 5G NR base stations offloading by means of NR-U technology	3	98–111
Diachenko Yu. G. see Sokolov I. A.		
Djukova E. V. and Masliakov G. O. On the choice of partial orders on feature values sets in the supervised classification problem	4	72–78
Dorofeeva A. V. see Korolev V. Yu.		
Egorova A. Yu. see Nuriev V. A.		
Flerov Yu. A. see Vyshinsky L. L.		
Flerov Yu. A. see Vyshinsky L. L.		
Gavrilov E. S. see Abgaryan K. K.		
Goncharenko M. B. and Zakharova T. V. Some properties of Gaussian mixtures and applications to magnetoencephalography problems	2	44–51
Goncharov A. A. and Inkova O. Yu. Extracting knowledge about means of expression of logical-semantic relations from the supracorpora database	2	96–103
Goncharov A. A. and Zatsman I. M. Structuring principles of electronic dictionary's entries	2	89–95
Goncharov A. A., Zatsman I. M., and Kruzhev M. G. Representation of new lexicographical knowledge in dynamic classification systems	1	86–93
Goncharov A. A., Zatsman I. M., Kruzhev M. G., and Loshchilova E. Yu. Capturing evolution of lexicographic knowledge in dynamic classification systems	4	41–49
Gorshenin A. K. and Kuzmin V. Yu. Method for improving accuracy of neural network forecasts based on probability mixture models and its implementation as a digital service	3	63–74

	Issue	Page
Grebenkova O. S., Bakhteev O. Yu., and Strijov V. V. Variational deep learning model optimization with complexity control	1	42–49
Grinchenko S. N. Anthropogenic “third” nature: The relatively autonomous status of its artificial intellectual subjects	4	110–114
Grinchenko S. N. On the system hierarchy of artificial intelligence	1	111–115
Grusho A. A., Grusho N. A., Zabezhailo M. I., Smirnov D. V., Timonina E. E., and Shorgin S. Ya. Statistics and clusters for detection of anomalous insertions in Big Data environment	4	79–86
Grusho A. A., Grusho N. A., Zabezhailo M. I., and Timonina E. E. Remote monitoring of workflows	3	2–8
Grusho A. A., Zabezhailo M. I., Smirnov D. V., and Timonina E. E. Intelligent analysis of Big Data extendible collections under the limits of process-real time	2	36–43
Grusho N. A. see Grusho A. A.		
Grusho N. A. see Grusho A. A.		
Ignatov A. N. see Bosov A. V.		
Inkova O. Yu. and Kruzhkov M. G. Structured definitions of discourse relations in the Supracorpora Database of Connectives	4	27–32
Inkova O. Yu. see Goncharov A. A.		
Istratov L. A. see Sigov A. S.		
Kamenskih A. N. see Sokolov I. A.		
Kazanchyan D. Kh. see Borisov A. V.		
Kazanchyan D. Kh. see Borisov A. V.		
Kharin P. A. see Kochetkova I. A.		
Khvatova T. Yu. see Zhukov D. O.		
Kirikov I. A. and Listopad S. V. Coordination of agents’ goals in cohesive hybrid intelligent multiagent systems	2	66–71
Kirikov I. A. see Rumovskaya S. B.		
Kochetkova I. A., Kushchazli A. I., Kharin P. A., and Shorgin S. Ya. Model for analyzing priority admission control of URLLC and eMBB communications in 5G networks as a resource queuing system	4	87–92
Kochetkova I. A., Vlaskina A. S., Vu N. N., and Shorgin V. S. Queuing system with signals for dynamic resource allocation for analyzing network slicing in 5G networks	3	91–97
Konovalov M. G. and Razumchik R. V. Routing jobs to heterogeneous parallel queues using distributed policy gradient algorithm	3	41–50
Korolev V. Yu. and Dorofeeva A. V. On the accuracy of the normal approximation under the violation of the normal convergence	1	116–121
Kovalev D. Yu. see Briukhov D. O.		
Kovalev I. A. see Zeifman A. I.		
Kovalyov S. P. Methods of the category theory in digital design of heterogeneous cyber-physical systems	1	23–29
Krivenko M. P. Soft computing in problems of medical diagnostics	2	52–59
Kruzhkov M. G. see Goncharov A. A.		
Kruzhkov M. G. see Goncharov A. A.		
Kruzhkov M. G. see Inkova O. Yu.		
Kudryavtsev A. A. and Shestakov O. V. Minimax estimates of the loss function based on integral error probabilities during threshold processing of wavelet coefficients	4	12–19
Kudryavtsev A. A., Shestakov O. V., and Shorgin S. Ya. A method for estimating bent, shape and scale parameters of the gamma-exponential distribution	3	57–62
Kudryavtsev A. A. see Arutyunov E. N.		
Kushchazli A. I. see Kochetkova I. A.		
Kuzmin V. Yu. see Gorshenin A. K.		
Kuznetsova R. V., Bakhteev O. Yu., and Chekhovich Yu. V. Methods of cross-lingual text reuse detection in large textual collections	1	30–41
Lipatiev A. A. Nonasymptotic analysis of Bartlett–Nanda–Pillai statistic for high-dimensional data	1	72–77

	Issue	Page
Listopad S. V. see Kirikov I. A.		
Loshchilova E. Yu. see Goncharov A. A.		
Malashenko Yu. E. Maximum internode flows at peak load of a multiuser network	3	24–28
Malashenko Yu. E. and Nazarova I. A. Analysis of peak load distribution in the multiuser network	4	20–26
Masliakov G. O. see Djukova E. V.		
Moltchanov D. A. see Daraseliya A. V.		
Monakhov M. M. Chebyshev–Edgeworth expansions for distributions of generalised Hotelling-type statistics based on random size samples	2	72–81
Naumov A. V. see Bosov A. V.		
Nazarova I. A. see Malashenko Yu. E.		
Nedolivko Iu. N. see Arutyunov E. N.		
Nuriev V. A. and Egorova A. Yu. Methods of quality estimation for machine translation: State-of-the-art	2	104–111
Pavlov Yu. L. Connectivity of configuration graphs in complex network models	1	18–22
Razumchik R. V. see Konovalov M. G.		
Rogdestvenski Yu. V. see Sokolov I. A.		
Rumovskaya S. B. and Kirikov I. A. Visual representation method for the conflict stimulation in hybrid intelligent multiagent systems	3	75–82
Samouylov K. E. see Daraseliya A. V.		
Satin Ya. A. see Zeifman A. I.		
Sevastianov L. A. see Shchetinin E. Yu.		
Shanin I. A. see Briukhov D. O.		
Shchetinin E. Yu. and Sevastianov L. A. On transfer learning methods in biomedical images classification tasks	4	59–64
Shestakov O. V. Analysis of the unbiased mean-square risk estimate of the block thresholding method	2	30–35
Shestakov O. V. Thresholding functions in the noise suppression methods based on the wavelet expansion of the signal	3	51–56
Shestakov O. V. see Kudryavtsev A. A.		
Shestakov O. V. see Kudryavtsev A. A.		
Shnurkov P. V. Creation of a stochastic dynamic one-sector economic model with discrete time and analysis of the corresponding optimal control problem	4	33–40
Shorgin S. Ya. see Grusho A. A.		
Shorgin S. Ya. see Kochetkova I. A.		
Shorgin S. Ya. see Kudryavtsev A. A.		
Shorgin V. S. see Kochetkova I. A.		
Sigov A. S., Andrianova E. G., and Istratov L. A. Stochastic dynamics of self-organizing social systems with memory (electoral processes)	2	112–121
Sinitsyn I. N. Normal suboptimal filtering for differential stochastic systems with unsolved derivatives	1	3–10
Smirnov D. V. see Grusho A. A.		
Smirnov D. V. see Grusho A. A.		
Sokolov I. A., Stepchenkov Yu. A., Diachenko Yu. G., Rogdestvenski Yu. V., and Kamenskih A. N. The electronic component base of failure resilience digital circuits	4	65–71
Sopin E. S. see Daraseliya A. V.		
Stepchenkov Yu. A. see Sokolov I. A.		
Strijov V. V. see Grebenkova O. S.		
Stupnikov S. A. see Briukhov D. O.		
Sushko D. V. Compression algorithms for force volume data I: Coding of prediction errors	2	82–88
Sushko D. V. Compression algorithms for force volume data II: Coding of wavelet transform components	3	16–23
Timonina E. E. see Grusho A. A.		

	Issue	Page
Timonina E. E. see Grusho A. A.		
Timonina E. E. see Grusho A. A.		
Ushakov N. G. see Ushakov V. G.		
Ushakov V. G. and Ushakov N. G. The multivariate distributions of output streams in a queueing system with preemptive repeat priority	2	26–29
Vlaskina A. S. see Kochetkova I. A.		
Vu N. N. see Kochetkova I. A.		
Vyshinsky L. L. and Flerov Yu. A. Information model of aircraft weight profile	1	50–56
Vyshinsky L. L. and Flerov Yu. A. Theoretical foundation of formation of aircraft weight appearance	4	93–102
Zabekhailo M. I. see Grusho A. A.		
Zabekhailo M. I. see Grusho A. A.		
Zabekhailo M. I. see Grusho A. A.		
Zakharova T. V. see Goncharenko M. B.		
Zaltzman A. D. see Zhukov D. O.		
Zatsman I. M. Forms representing new knowledge discovered in texts	3	83–90
Zatsman I. M. Problem-oriented updating of dictionary entries of bilingual dictionaries and medical terminology: Comparative analysis	1	94–101
Zatsman I. M. The conception of creating WHO Hub for Pandemic and Epidemic Intelligence: Keywords and their terminological analysis	4	103–109
Zatsman I. M. see Goncharov A. A.		
Zatsman I. M. see Goncharov A. A.		
Zatsman I. M. see Goncharov A. A.		
Zeifman A. I., Satin Ya. A., and Kovalev I. A. On one nonstationary service model with catastrophes and heavy tails	2	20–25
Zhukov D. O., Khvatova T. Yu., and Zaltzman A. D. Modeling of the stochastic dynamics of changes in node states and percolation transitions in social networks with self-organization and memory	1	102–110
Zhukov D. V. see Bosov A. V.		

Правила подготовки рукописей для публикации в журнале «Информатика и её применения»

Журнал «Информатика и её применения» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информатики и ее приложений.

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

Тематика журнала охватывает следующие направления:

- теоретические основы информатики;
- математические методы исследования сложных систем и процессов;
- информационные системы и сети;
- информационные технологии;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных комплексов и сетей.

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

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

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

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

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

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

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

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

4. Решение редколлегии о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.
5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редакции должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или ЛАТЭХ (.tex), дополнительно — в формате .pdf, на дискете, лазерном диске или электронной почтой. Предоставление бумажной рукописи необязательно.

7. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки.

Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху — 2, 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/journal/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 почтового адреса организации и электронного адреса каждого автора;
- сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/issues/2013_07_01/authors.asp и
http://www.ipiran.ru/journal/issues/2013_07_01_eng/authors.asp;
- аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
- ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами;
- источники финансирования работы (ссылки на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.).

9. Требования к спискам литературы.

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

Списки литературы представляются в двух вариантах:

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

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

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

Ниже приведены примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”.

Описание статьи из журнала:

Zagurenko, A. G., V. A. Korotovskikh, A. A. Kolesnikov, A. V. Timonov, and D. V. Kardymon. 2008. Tekhniko-ekonomicheskaya optimizatsiya dizayna gidrorazryva plasta [Technical and economic optimization of the design of hydraulic fracturing]. *Neftyanoe hozyaystvo [Oil Industry]* 11:54–57.

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 статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov, M. V., and T. V. Tagantsev. 2006. Eksperimental'noe issledovanie prochnosti soedineniy “stal’–kompozit” [Experimental study of the strength of joints “steel–composite”]. *Trudy MGTU “Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem” [Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems” Proceedings]*. 593:125–130.

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 povysheniya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Latyshev, V. N. 2009. *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanii metallov* [Tribology of cutting. Vol. 1: Frictional processes in metal cutting]. Ivanovo: Ivanovskii State Univ. 108 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: Wiley. 521 p.

Описание неопубликованного документа:

Laturov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004 (unpubl.). *Geologiya i dobycha (NGT GiD)* [Geology and production (NGT GiD)]. Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198.

Описание интернет-ресурса:

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov, V. I. 2003. *Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyy tor* [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. Moscow. D.Sc. Diss. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. *Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya informatsionnogo monitoringa* [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. Moscow: IPI RAN. PhD Thesis. 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 «Информатика и её применения» является некоммерческим изданием. Плата за публикацию не взимается, гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции журнала «Информатика и её применения»:

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: iiep@frccsc.ru (Стригина Светлана Николаевна)

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

Requirements for manuscripts submitted to Journal “Informatics and Applications”

Journal “Informatics and Applications” (Inform. Appl.) publishes theoretical, review, and discussion articles on the research and development in the field of informatics and its applications.

The journal is published in Russian. By a special decision of the editorial board, some articles can be published in English.

The topics covered include the following areas:

- theoretical fundamentals of informatics;
- mathematical methods for studying complex systems and processes;
- information systems and networks;
- information technologies; and
- architecture and software of computational complexes and networks.

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 “Informatics and Applications” 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).

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 the authors receive their article for correction after reviewing, it does not mean that the article is approved for publication. The corrected article should be sent to the Editorial Board for the subsequent review and approval.
4. The decision on the article publication or its rejection is communicated to the authors. The Editorial Board may also send the reviews on the submitted articles to the authors. Any discussion upon the rejected articles is not possible.
5. The edited articles will be sent to the authors for proofread. The comments of the authors to the edited text of the article should be sent to the Editorial Board as soon as possible.
6. The manuscript of the article should be presented electronically in the MS WORD (.doc or .docx) or L^AT_EX (.tex) formats, and additionally in the .pdf format. All documents may be sent by e-mail or provided on a CD or diskette. A hard copy submission is not necessary.
7. The recommended typesetting instructions for manuscript.

Pages parameters: format A4, portrait orientation, document margins (cm): left — 2.5, right — 1.5, above — 2.0, below — 2.0, footer 1.3.

Text: font — Times New Roman, font size — 14, paragraph indent — 0.5, line spacing — 1.5, justified alignment.

The recommended manuscript size: not more than 10 pages of the specified format. If the specified size exceeded, the editorial board is entitled to require the author to reduce the manuscript.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site: <http://www.ipiran.ru/journal/template.doc>.

8. The 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/issues/2013_07_01/authors.asp and

http://www.ipiran.ru/journal/issues/2013_07_01_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 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).
- Article from the continuing publication (collection of works, proceedings):**
Astakhov, M. V., and T. V. Tagantsev. 2006. Eksperimental’noe issledovanie prochnosti soedineniy “stal’–kompozit” [Experimental study of the strength of joints “steel–composite”]. *Trudy MGTU “Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem” [Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems” Proceedings]*. 593:125–130.
- 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 povysheniya neftegazooitdachi” [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]*. Moscow. 267–272.
- Books and other monographs:**
Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem [Operation of turbine generators with direct cooling]*. Moscow: Energy Publs. 352 p.
- Dissertation and Thesis:**
Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya informatsionnogo 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. “Informatics and Applications” 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: iiep@frccsc.ru (to Svetlana Strigina)
<http://www.ipiran.ru/english/journal.asp>