

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 25

2019

№ 6

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

Рисунок к статье А. Б. Барского, Д. И. Мельника, В. В. Пирожника

«МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ»

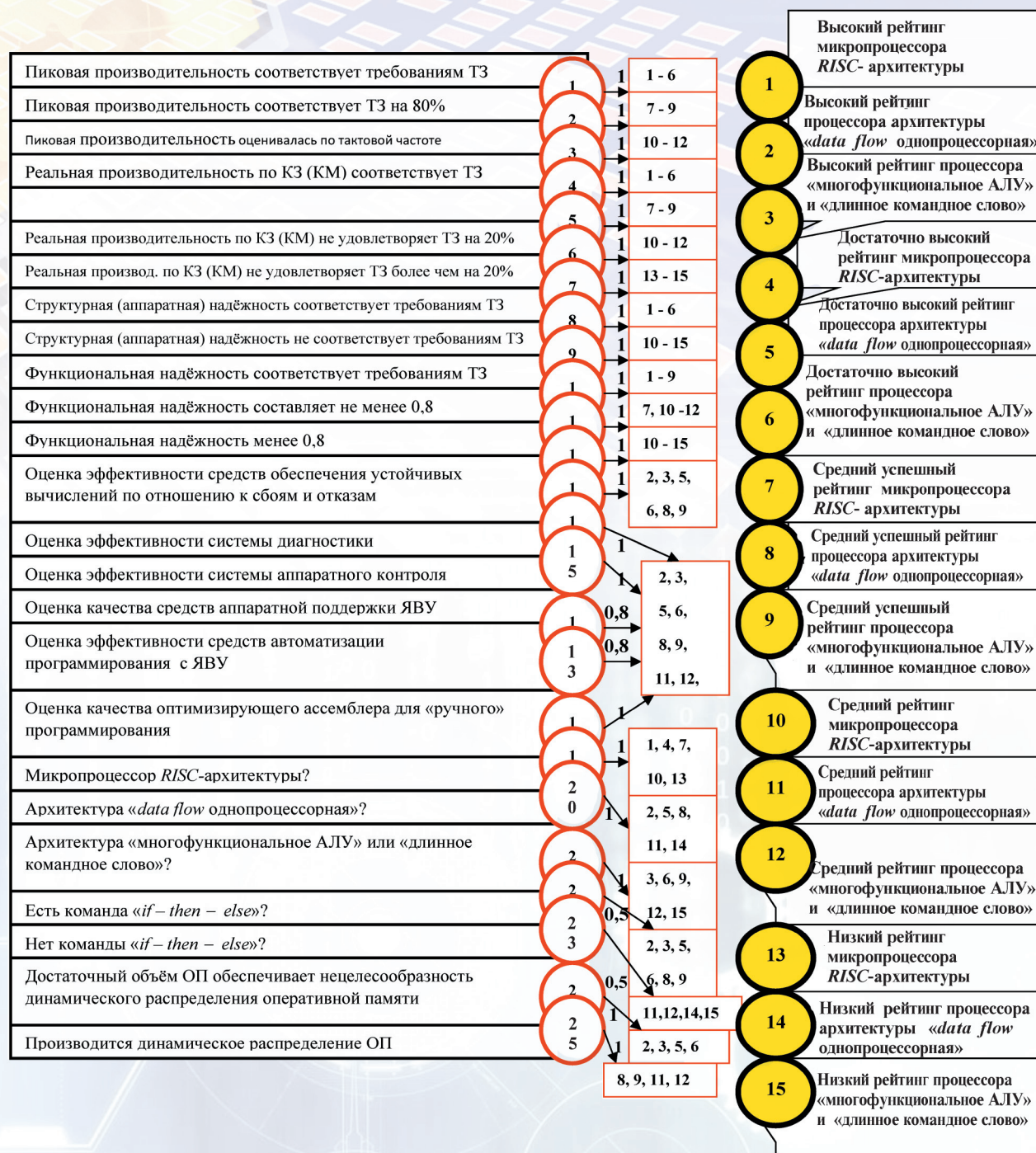


Рис. 1. Фрагмент логической нейронной сети для оценки качества процессора (микропроцессора)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 25
2019
№ 6

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Деменков Н. П., Микрин Е. А., Мочалов И. А. Нечеткое оптимальное управление линейными системами. Часть 2. Программное управление 323
- Нефедов А. С., Шакиров В. А. Автоматизация процедуры заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критериям при использовании метода анализа иерархий 331
- Левин В. И. Непрерывная логика и анализ надежности сложных систем. Исследование некоторых классов систем 340

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Гридин В. Н., Анисимов В. И., Абухазим М. М. Индексно-численная технология сжатия данных в системах автоматизации схемотехнического проектирования 349

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

- Барский А. Б., Мельник Д. И., Пирожник В. В. Модель управления качеством вычислительных средств распределённой многоканальной системы массового обслуживания 358

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Жарков А. В. Формирование классификационных признаков распознавания объектов при использовании лазерно-локационных средств их сканирования 368

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Кромина Л. А., Ярцев Р. А. Об учете авторской значимости литературных ссылок при оптимизации заказа книжных изданий для библиотеки вуза 373
- Полищук Ю. В. Взаимосвязь ценности и старения информации при управлении большими техническими системами 381

Главный редактор:

СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:

БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.
КУЛЕШОВ А. П.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ПОПКОВ Ю. С.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
РУСАКОВ С. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
РЯБОВ Г. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОЙФЕР В. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СОКОЛОВ И. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ШАХНОВ В. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
ШОКИН Ю. И.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ЮСУПОВ Р. М.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.
АНТОНОВ Б. И.
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.
ВАСИЛЬЕВ В. И., д. т. н., проф.
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.
КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.
ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.
МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.
ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.
САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

INFORMATION TECHNOLOGIES

INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 25
2019
No. 6

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

CONTENTS

MODELING

- Demenev N. P., Mikrin E. A., Mochalov I. A.** Fuzzy Optimal Control of Linear Systems. Part 2. Program Control 323
- Nefedov A. S., Shakirov V. A.** Automation of the Procedure for Filling Matrices of Pairwise Comparison of Alternatives by Criteria when using the Analytic Hierarchy Process 331
- Levin V. I.** Continuous Logic and Analysis of Reliability of Complex Systems. Investigation of Some Classes of Systems 340

CAD-SYSTEMS

- Gridin V. N., Anisimov V. I., Abuhazim M. M.** Index-Numerical Technology of Data Compression in Automation Systems of Circuit Design 349

COMPUTING SYSTEMS AND NETWORKS

- Barsky A. B., Melnik D. I., Pirozhnik V. V.** Model of Quality Management of Computing Facilities of a Distributed Multi-Channel Queuing System 358

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

- Zharkov A. V.** Formation of Classification Signs of Object Recognition when Using Laser-Location Means of their Scanning 368

APPLICATION INFORMATION SYSTEMS

- Kromina L., Yartsev R.** On the Account of the Author's Significance Of Literary References by Optimization of the Order of Book Editions for the University Library 373
- Polishuk Yu. V.** Relations between Significance and Aging of Information when Control Big Technical Systems 381

Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kuleshov A. P., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Popkov Yu. S., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Soifer V. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov I. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Suetin N. V.,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Chaplygin Yu. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shokin Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Antonov B. I.
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Vasiliev V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Martynov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

Editors:

Bezmenova M. Yu.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

Н. П. Деменков, канд. техн. наук, доц., e-mail: dnp@bmstu.ru,
Е. А. Микрин, д-р техн. наук, проф., e-mail: evgeny.mikrin@bmstu.ru,
И. А. Мочалов, д-р техн. наук, проф., e-mail: intelsyst@mail.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Нечеткое оптимальное управление линейными системами. Часть 2. Программное управление*

Рассмотрена задача синтеза оптимального управления на основе принципа максимума, при решении которой двухточечная краевая задача трансформируется в задачу Коши для нечетких нелинейных дифференциальных уравнений типа Риккати. Приведен пример.

Ключевые слова: нечеткие краевые задачи, синтез нечетких оптимальных регуляторов, нечеткие дифференциальные уравнения, функция принадлежности, нечеткая начальная задача, принцип максимума, динамическое программирование, критерий обобщенной работы

Введение

При использовании принципа максимума для решения задачи оптимального управления необходимо решать двухточечную краевую задачу для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которая является более сложной, чем исходная. Однако в некоторых важных случаях, например, при оптимизации линейных систем с квадратичным функционалом, двухточечная задача может быть преобразована к задаче Коши.

Насущной проблемой является решение задачи оптимального управления в нечеткой трактовке, когда динамические параметры объекта управления (ОУ) и краевые условия представляются нечеткими переменными. Весьма актуальной является задача определения типов оптимальных управлений с представлением их в сильной/слабой формах. Тип и форма управления дают новые качества нечеткого оптимального управления и определяют научную новизну предлагаемой работы. Объектом исследования здесь является задача нахождения нечеткого оптимального управления с использованием принципа максимума Л. С. Понтря-

гина, когда соответствующая двухточечная краевая задача трансформируется к начальной.

1. Постановка задачи

Применительно к синтезу нечеткого оптимального управления на основании принципа максимума, как и в уравнениях (6), (7) [1], задаются нечеткая линейная модель объекта управления с нечеткими начальными условиями

$$\dot{x}_H(t) = A_H(t)x_H(t) + B_H(t)u_H(t), \quad x_H(t_0) = x_{H0} \quad (1)$$

и нечетким квадратичным функционалом

$$J_H = 0,5 = x_H^T(t_k)G_H x_H(t_k) + 0,5 \int_{t_0}^{t_k} (x_H^T Q_H(t)x_H + u_H^T R_H(t)u_H) dt, \quad (2)$$

где $x_H = (x_{H1}, \dots, x_{Hn})^T \in E^n$ — нечеткий вектор состояния; $u_H = (u_{H1}, \dots, u_{Hm})^T \in E^m$ — нечеткий вектор управления; $A_H(t)$, $B_H(t)$, G_H , $Q_H(t)$ и $R_H(t)$ — матрицы согласованных размеров с нечеткими элементами и треугольными функциями принадлежности, симметрические матрицы G_H и $Q_H(t)$ неотрицательно определены, симметрическая матрица $R_H(t)$ положительно определена; $x_H(t_k)$ — нечеткий свободный пра-

*Часть 1 опубликована в журнале "Информационные технологии", 2019, т. 25, № 5, с.259–270.

вый конец траектории, с заданными моментами времени t_0 и t_k начала и окончания процесса соответственно.

В этих условиях необходимо найти нечеткое оптимальное управление $u_n(t)$ с использованием принципа максимума, определить известные типы S (Seikkala) или BF (Buckley — Feuring) [1] оптимальных управлений для динамической модели ОУ с нечеткими динамическими параметрами, нечеткими начальными условиями и заданным качеством управления в виде нечеткого функционала.

2. Методы решения нечетких оптимизационных задач на основе принципа максимума

При решении нечеткой задачи оптимизации на основе принципа максимума появляется необходимость решения двухточечной краевой задачи для нечеткого дифференциального уравнения. По аналогии с традиционным подходом используем прием переноса граничных условий в одну точку [2]. Это позволяет трансформировать исходную задачу к нечеткой начальной задаче. При существовании ее решения существует и решение краевой задачи.

В соответствии с общим принципом решения нечетких дифференциальных уравнений, изложенным в [1], первоначально решается традиционная задача с переносом граничных условий, а затем после фазификации параметров задачи решается соответствующая нечеткая задача.

Для решения четкой задачи в соответствии с принципом максимума составляется функция Гамильтона

$$H = (Ax, p) + (Bu, p) - (x, Qx) - (u, Ru), \quad (3)$$

где $p(t)$ — вектор вспомогательных (сопряженных) переменных.

Оптимальное управление находится из условия максимума по u функции Гамильтона. Для этого решается каноническая система дифференциальных уравнений

$$\dot{p}(t) = -\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^T = -A^T p + (Q + Q^T)x; \quad (4)$$

$$H'_u = \frac{\partial H}{\partial u} = B^T p - (R + R^T)u = 0. \quad (5)$$

Из уравнения (5) для случая отсутствия ограничений на управление имеем

$$u(t) = (R + R^T)^{-1} B^T p(t). \quad (6)$$

Подставив выражение (6) в четкое уравнение, соответствующее нечеткому (1), получим

$$\dot{x} = Ax + B(R + R^T)^{-1} B^T p; \quad (7)$$

$$\dot{p} = (Q + Q^T)x - A^T p. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) вместе с граничными условиями $x(t_0) = x_0$, $p(t_k) = p_k$ представляют собой однородную двухточечную краевую задачу для линейной системы дифференциальных уравнений порядка $2n$:

$$\dot{F} = EF, \quad (9)$$

где

$$F = \begin{bmatrix} x \\ p \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} A & B(R + R^T)^{-1} B^T \\ (Q + Q^T)^T & -A^T \end{bmatrix},$$

$$x(t_0) = x_0, p(t_k) = p_k.$$

Однородная краевая задача (9) имеет тривиальное решение $F(t) = 0$, однако часто представляет интерес решение $F(t) \neq 0$. В этом случае в дифференциальное уравнение или краевые условия вводят параметр μ , изменяя который можно получить решение $F(\mu, t) \neq 0$.

Для нахождения нетривиального решения обычно используют следующие методы [2—7]:

i_1) подстановки в краевые условия произвольных постоянных, входящих в формулу общего решения уравнения, и их нахождения. Однако в этом случае решение краевой задачи может не существовать или иметь бесконечно много решений;

i_2) сведения краевой задачи к начальной путем переноса граничных условий слева направо;

i_3) преобразования краевой задачи к начальной за счет введения параметризации;

i_4) построения функции Грина краевой задачи;

i_5) нахождение собственных значений в задаче Штурма — Лиувилля краевой задачи.

2.1. Алгоритм переноса краевых условий. Трансформируем полученную двухточечную задачу (9) в начальную по методу i_2 , т. е. путем переноса граничных условий [2].

Пусть для уравнения

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t)$$

необходимо перенести линейное краевое условие α_0 при $t = t_0$

$$\alpha_0 = (l_0, x_0) = \sum_{j=1}^n l_{0j} x_j(t_0) \quad (10)$$

на правый конец $t = t_k$.

Согласно работе [2] для того, чтобы перенести α в любую точку $t = t_k$, необходимо решить задачу Коши для сопряженной системы

$$\dot{l} = -A^T(t)l, \quad l(t_0) = l_0 \quad (11)$$

относительно вектора l и далее скалярную задачу Коши

$$\dot{\alpha} = (l, B(t)u), \quad \alpha_0 = (l_0, x_0) \quad (12)$$

относительно α .

После интегрирования уравнения (12) получим

$$\alpha(t_k) = (l, x)_{t=t_k} = (l, x)_{t=t_0} + \int_{t_0}^{t_k} (l, B(t)u) dt. \quad (13)$$

В результате формируется линейное краевое условие на правом конце для любого $t = t_k$: $\alpha(t_k) = (l, x)_{t=t_k}$.

При компьютерной реализации алгоритма переноса граничных условий обычно возникает проблема неустойчивости решения сопряженной системы (11), связанная с наличием в некоторых случаях быстрорастущих решений. Эта проблема решается по методу А. А. Абрамова путем решения начальной задачи для нелинейных дифференциальных уравнений [3, 7].

В случае необходимости перенесения s условий при $t = 0$ для двухточечной краевой задачи

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad x_j(t_0) = \alpha_{0j}, \quad j = \overline{1, s},$$

$$x_j(t_k) = \beta_{kj}, \quad j = \overline{s+1, n},$$

на правый конец траектории при $t = t_k$, решение состоит из следующих шагов.

1. Формируется начальная задача по нахождению векторов сопряженных переменных \bar{l}^j

$$\dot{l}^j = -A^T(t)l^j, \quad l^j(0) = (1, \dots, 1, \dots)^T, \quad j = \overline{1, s}. \quad (14)$$

2. Задается начальная задача по определению вектора $\alpha(t_k)$

$$\dot{\alpha}_j = (l^j, B(t)u), \quad \alpha_j(0) = \alpha_{j0}, \quad j = \overline{1, s}. \quad (15)$$

3. Решается система алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \alpha_j(t_k) &= (x, l^j)_{t=t_k} = \\ &= \sum_{i=1}^s x_i(t_k) l_i^j(t_k) + \sum_{i=s+1}^n \beta_{ki} l_i^j(t_k), \quad j = \overline{1, s} \end{aligned} \quad (16)$$

относительно $x_j(t_k)$.

Таким образом, для уравнения (9) будем иметь задачу Коши:

$$\dot{F} = EF, \quad F_j(t_k) = (l^j(t_k), x(t_k)), \quad j = \overline{1, n}, \quad (17)$$

где n — число переносимых начальных условий в конечный момент времени $t = t_k$.

Таким же образом может быть решена аналогично и задача переноса однородных краевых условий, которые появляются, если в уравнении (9) система координат переносится в точку $t = t_0$.

Пример 1. Имеем двухточечную краевую задачу

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$x_1(4) = 9,5, \quad x_2(1) = 1.$$

Необходимо перенести условия из точки $x_2(1)$ в точку $x_2(4)$. Полагаем, что граничные условия $x_1(t_0)$, $x_2(t_0)$ связаны между собой линейной комбинацией

$$l_1(t_0)x_1(t_0) + l_2(t_0)x_2(t_0) = \alpha_0,$$

где l_1 , l_2 , α подлежат определению из следующих уравнений:

$$\dot{l} = -A^T l, \quad l_1(1) = 0, \quad l_2(1) = 1,$$

$$\dot{\alpha} = (l, Bu), \quad \alpha_0(1) = 1.$$

Решаем первое уравнение традиционным методом [8]. Из характеристического уравнения имеем

$$\begin{aligned} |-A^T - \lambda I| = 0 &\Rightarrow \left\| \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\| = \\ &= 0 \Rightarrow \lambda^2 = 0 \Rightarrow \lambda_{1,2} = 0. \end{aligned}$$

Корни кратные, поэтому общее решение для каждой компоненты имеет вид

$$l_1(t) = (a_{11} + a_{12}t)e^{\lambda t} = a_{11} + a_{12}t,$$

$$l_2(t) = (a_{21} + a_{22}t)e^{\lambda t} = a_{21} + a_{22}t.$$

Находим соотношение между a_{ij} . Для этого $l_1(t)$ и $l_2(t)$, найденные ранее, подставляем в уравнение $\dot{l} = -A^T l$, из которого следует

$$\dot{l}_1 = -l_2 \Rightarrow \frac{d}{dt}(a_{11} + a_{12}t) =$$

$$= -(a_{21} + a_{22}t) \Rightarrow a_{12} = -a_{21} - a_{22}t,$$

откуда, приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях t , получим

$$a_{12} = -a_{21}, a_{22} = 0.$$

В результате имеем:

$$\begin{aligned} l_1(t) &= a_{11} + a_{12}t, \\ l_2(t) &= a_{21} + a_{22}t = -a_{12}. \end{aligned}$$

Учитывая значения $a_{11} = 1, a_{12} = -1, a_{21} = 1,$ получаем общее решение

$$l_1(t) = 1 - t, l_2(t) = 1.$$

Находим α из скалярного уравнения

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= (l, Bu), \alpha_0(1) = 1 \Rightarrow \\ \Rightarrow \dot{\alpha} &= l_1 u_1 + l_2 u_2 = l_1 t + l_2 \cdot 0 = (1 - t)t \Rightarrow \\ \Rightarrow \alpha &= \frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3} + \frac{5}{6} \Rightarrow \alpha(4) = -12,5. \end{aligned}$$

Таким образом, для любого момента времени имеем

$$l_1(t)x_1(t) + l_2(t)x_2(t) = \alpha(t).$$

Для конечного момента времени $t_k = 4$

$$\begin{aligned} \alpha_k &= -12,5 = l_1(t_k)x_1(t_k) + l_2(t_k)x_2(t_k) = \\ &= -3 \cdot 9,5 + 1 \cdot x_2(4) \Rightarrow x_2(4) = 16. \end{aligned}$$

Итак, исходная двухточечная краевая задача

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = t \\ \dot{x}_2 = x_1 \end{cases}, x_1(4) = 9,5, x_2(1) = 1$$

трансформировалась в традиционную начальную задачу

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = t \\ \dot{x}_2 = x_1 \end{cases}, x_1(4) = 9,5, x_2(4) = 16.$$

2.2. Алгоритм решения нечеткой краевой задачи. Переход к нечеткой краевой задаче выполняется путем фазификации элементов (параметров) матрицы E для классической задачи (17) и применения к ней принципа расширения при получении ее S решения [9]. Для этого определяются элементы s_{ij} матрицы S по элементам матрицы E в (17) следующим образом:

$$\begin{cases} s_{ij} = s_{i+4n, j+4n} = e_{ij}, e_{ij} \geq 0; \\ s_{ij+4n} = s_{i+4n} = -e_{ij}, e_{ij} < 0; \\ 0 \text{ для остальных.} \end{cases} \quad (18)$$

Это преобразование приводит к системе порядка $4n$:

$$\begin{bmatrix} \dot{F} \\ \dot{\bar{F}} \end{bmatrix} = S_{(4n \times 4n)} \begin{bmatrix} F \\ \bar{F} \end{bmatrix}_{(4n \times 1)}, \quad (19)$$

с нечеткими граничными условиями $x_H = (x_{H0} \ x_{Hk})^T_{(1 \times 4n)}$.

Нечеткое решение $F_H(t) = (\underline{F}(r, t), \bar{F}(r, t))$ $r \in [0; 1]$ находится из полученной классической системы (17) традиционным способом с использованием переходной матрицы $\Phi(t, \tau)$

$$F_H(r, t) = \begin{bmatrix} F \\ \bar{F} \end{bmatrix}_{(4n \times 1)} = \Phi(t, \tau)_{(4n \times 4n)} \begin{bmatrix} x_0(r) \\ x_k(r) \\ \bar{x}_0(r) \\ \bar{x}_k(r) \end{bmatrix}_{(4n \times 1)}. \quad (20)$$

Матрица перехода $\Phi(t, \tau)$ обычно находится путем вычисления фундаментальной матрицы $\varphi(t)$, которая связана с $\Phi(t, \tau)$ матричным соотношением

$$\Phi(t, \tau) = \varphi(t)\varphi^{-1}(\tau). \quad (21)$$

Возможны и другие способы определения $\Phi(t, \tau)$, например, путем разложения Сильвестра, применения теоремы Кели — Гамильтона, представления матричной экспоненты в виде степенного ряда и другими способами [10].

При вычислении $\Phi(t, \tau)$ на основе использования фундаментальной матрицы $\varphi(t)$ находятся корни характеристического уравнения

$$|S - \omega I| = 0, \quad (22)$$

где I — единичная матрица. В зависимости от типа корней характеристического уравнения — действительные и различные, действительные кратные, комплексные — записывается общее решение для каждой компоненты вектора $F_H(t)$ с точностью до различных между собой произвольных постоянных.

В итоге находится фундаментальная матрица $\varphi(t)$, обратная ей $\varphi^{-1}(\tau)$, переходная матрица $\Phi(t, \tau)$ по соотношению (21) и далее определяется решение (17).

Пример 1 (продолжение). Пусть для двухточечной краевой задачи с матрицей

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, x_{1H}(4) = 9,5_H, x_{2H}(4) = 16_H$$

имеем нечеткие начальные условия. Требуется найти решение нечеткой начальной задачи и определить его свойства.

Матрица S , формируемая по соотношениям (18), имеет вид

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Решим характеристическое уравнение (22):

$$\Delta = |S - \omega I| = 0 \Leftrightarrow \begin{vmatrix} -\omega & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega \end{vmatrix} = 0.$$

Разложение по первому столбцу дает соотношение $\Delta = \omega^4 = 0$, откуда корни характеристического уравнения $\omega_i = 0$, $i = 1, \dots, 4$, действительные и кратные.

Общее решение для каждой компоненты с учетом кратности и $\omega_i = 0$ имеет вид

$$\begin{aligned} \underline{x}_1(t) &= \sum_{i=1}^4 C_i t^{i-1}, & \underline{x}_2(t) &= \sum_{i=1}^4 B_i t^{i-1}, \\ \bar{x}_1(t) &= \sum_{i=1}^4 D_i t^{i-1}, & \bar{x}_2(t) &= \sum_{i=1}^4 E_i t^{i-1}. \end{aligned}$$

Для нахождения C_i , B_i , D_i и E_i , $i = 1, \dots, 4$, компоненты $\underline{x}_1(t)$, $\underline{x}_2(t)$, $\bar{x}_1(t)$ и $\bar{x}_2(t)$ подставим в исходное уравнение (19):

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{x}}_1 \\ \dot{\underline{x}}_2 \\ \dot{\bar{x}}_1 \\ \dot{\bar{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x}_1 \\ \underline{x}_2 \\ \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix}$$

и приравняем коэффициенты при подобных членах. В результате получим следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} C_2 = B_1; \\ 2C_3 = B_2; \\ 3C_4 = B_3; \\ B_4 = 0; \end{cases} \begin{cases} B_2 = 0; \\ B_3 = 0; \\ B_4 = 0; \end{cases} \begin{cases} D_2 = E_1; \\ 2D_3 = E_2; \\ 3D_4 = E_3; \\ E_4 = 0; \end{cases} \begin{cases} E_2 = 0; \\ E_3 = 0; \\ E_4 = 0. \end{cases}$$

Из первых двух систем имеем $C_1, C_2 = B_2$, а из двух последних соответственно $E_1, E_2 = D_2$. После переобозначений получим общее решение в виде

$$\begin{aligned} \underline{x}_1(t) &= A_1 t + A_2, & \underline{x}_2(t) &= A_1, \\ \bar{x}_1(t) &= A_3 t + A_4, & \bar{x}_2(t) &= A_3. \end{aligned}$$

Константы A_i , $i = 1, \dots, 4$, находятся из нечетких начальных условий

$$\begin{aligned} x_{1н}(4) &= 9,5_{н} = (\underline{9,5}(r), \overline{9,5}(r) | r \in [0; 1]); \\ x_{2н}(4) &= 16_{н} = (\underline{16}(r), \overline{16}(r) | r \in [0; 1]), \end{aligned}$$

что приводит к линейной системе алгебраических уравнений относительно A_i , $i = 1, \dots, 4$:

$$S_1 A = Y, \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} A &= (A_1, A_2, A_3, A_4)^T, \\ Y &= (\underline{9,5}(r), \underline{16}(r), \overline{9,5}(r), \overline{16}(r))^T, \end{aligned}$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} B & C \\ C & B \end{bmatrix},$$

$$\text{где } B = \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В соответствии с базовыми определениями теории нечетких систем линейных алгебраических уравнений (НСЛАУ), приведенными в Приложении, имеем

$$|B - C| = -1 \neq 0, |B + C| = -1.$$

Поэтому $|S_1| \neq 0$, и решение алгебраического уравнения (23) существует и единственно [11]. Обратная матрица S_1^{-1} равна

$$S_1^{-1} = \begin{bmatrix} D_1 & E_1 \\ E_1 & D_1 \end{bmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} D_1 &= 0,5[(B + C)^{-1} + (B - C)^{-1}] = \\ &= 0,5 \cdot 2 \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = -1 \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -4 \end{bmatrix}; \\ E_1 &= 0,5[(B + C)^{-1} - (B - C)^{-1}] = 0. \end{aligned}$$

Следовательно, решение уравнения (20) имеет вид

$$A = S^{-1} Y \Leftrightarrow \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{9,5}(r) \\ \underline{16}(r) \\ \overline{9,5}(r) \\ \overline{16}(r) \end{bmatrix},$$

$$A_1(r) = \underline{16}(r); A_2(r) = \underline{9,5}(r) - 4 \cdot \underline{16}(r);$$

$$A_3(r) = \overline{16}(r); A_4(r) = \overline{9,5}(r) - 4 \cdot \overline{16}(r).$$

В результате получим нечеткое решение начальной задачи:

$$x_{1н}(t) = (\underline{x}_1(r, t), \overline{x}_1(r, t) | r \in [0; 1]) =$$

$$= (\underline{x}_1(r, t) = A_1(r)t + A_2(r), \overline{x}_1(r, t) =$$

$$= A_3(r)t + A_4(r) | r \in [0; 1]) =$$

$$= (\underline{x}_1(r, t) = \underline{16}(r)t + \underline{9,5}(r) - 4 \cdot \underline{16}(r), \overline{x}_1(r, t) =$$

$$= \overline{16}(r)t + \overline{9,5}(r) - 4 \cdot \overline{16}(r) | r \in [0; 1]);$$

$$x_{2н}(t) = (\underline{x}_2(r, t), \overline{x}_2(r, t) | r \in [0; 1]) =$$

$$= (\underline{x}_2(r, t) = A_1(r), \overline{x}_2(r, t) = A_3(r) | r \in [0; 1]) =$$

$$= (\underline{16}(r), \overline{16}(r) | r \in [0; 1]).$$

Исследуем тип (сильное/слабое) полученного решения. Для этого задаем начальные условия в виде нечетких треугольных чисел:

$$9,5_H = (9,5 - \alpha_1 | 9,5 | 9,5 + \alpha_1),$$

$$16_H = (16 - \alpha_2 | 16 | 16 + \alpha_2), \alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0.$$

Тогда

$$\underline{x}_1(0, t) = \underline{16}t + \underline{9,5} - 4 \cdot \underline{16}, \overline{x}_1(0, t) =$$

$$= \overline{16}t + \overline{9,5} - 4 \cdot \overline{16} \Rightarrow x_1(0, t) = (16 - \alpha_2)t +$$

$$+ (9,5 - \alpha_1) - 4(16 - \alpha_2), \overline{x}_1(0, t) =$$

$$= (16 + \alpha_2)t + (9,5 + \alpha_1) - 4(16 + \alpha_2).$$

Для того, чтобы при любых моментах времени t $x_{1н}(t)$ было сильным числом, необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$\overline{x}_1(\cdot) > \underline{x}_1(\cdot) \Leftrightarrow \beta \alpha_2 + \alpha_1 > 0, \beta = t - 4.$$

Поэтому при $t < 4$, когда $\beta < 0$, а $\alpha_2 > 2\alpha_1\beta^{-1}$, $x_{1н}(t)$ будет сильным числом, а при $t > 4$, когда $\beta > 0$, получим $\alpha_2 < 2\alpha_1\beta^{-1}$. Это означает, что $x_{1н}(t)$ после соответствующей замены является слабым числом.

Аналогичные исследования были проведены и для координаты $x_{2н}(t)$.

Таким образом, в результате фазификации задачи (17) и использования принципа расширения в соответствии с работой [9] получили решение нечеткой задачи (17).

Заключение

Сформулирована нечеткая оптимизационная задача при использовании принципа максимума. Полученная при ее решении двухточечная краевая задача для нечеткого дифференциального уравнения решена путем трансформации ее к соответствующей начальной задаче в векторной форме и получении для нее решения S типа. На примере системы второго порядка с нечеткими начальными условиями показано, что при определенных условиях существуют сильные/слабые решения для решений S типа.

Как показали проведенные в части 1 и части 2 исследования, использование теории нечетких множеств при решении прикладных задач теории оптимального управления позволяет более полно учитывать различные возмущения и создавать более адекватные модели и алгоритмы по сравнению с традиционным подходом.

Список литературы

1. Деменков Н. П., Микрин Е. А., Мочалов И. А. Нечеткое оптимальное управление линейными системами. Часть 1. Позиционное управление // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 5. С. 259–270.
2. Моисеев Н. Н. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1975. 576 с.
3. Деменков Н. П. Вычислительные аспекты решения задач оптимального управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 171 с.
4. Филиппов А. Ф. Сборник задач по дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1973. 128 с.
5. Агафонова С. А., Герман А. Д., Муратова Т. В. Дифференциальные уравнения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 347 с.
6. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971. 576 с.
7. Абрамов А. А. О переносе граничных условий для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1961. Т. 1, № 3. С. 542–545.
8. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1967. 576 с.
9. Amir Sadeghi, Ahmad Izani Md. Ismail, Ali F. Jameel. Solving systems of fuzzy differential equation // International Mathematical Forum. 2011. Vol. 6, N. 42. P. 2087–2100.
10. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. М.: Наука, 1975. 768 с.
11. Friedman M., Ming M., Kandel A. Fuzzy linear systems // Fuzzy sets and systems. 1998. N. 96. P. 201–209.
12. Мочалов И. А., Хрисат М. С. Оценивание параметров модели по нечетким случайным данным // Информационные технологии. 2014. № 2(210). С. 14–22.
13. Афанасьев В. Н., Колмановский В. Б., Носов В. Р. Математическая теория построения систем управления. М.: Высшая школа, 2003. 615 с.

Принято следующее определение нечетких систем линейных алгебраических уравнений (НСЛАУ) [11, 12]: это линейное уравнение относительно вектора X :

$$AX = Y_n,$$

где $A = \{a_{ij}\}$, $i, j = 1, \dots, n$, — матрица с элементами из четких чисел, т.е. функция принадлежности $r_{ij}(a)$ элементов a_{ij} одиночного (singleton) типа:

$$r_{ij}(a) = \text{singl}(a - a_{ij}) = \begin{cases} 1, & a = a_{ij}; \\ 0, & a \neq a_{ij}; \end{cases}$$

$Y_n = (y_{1n}, \dots, y_{nn})$ — вектор, имеющий нечеткие компоненты с заданными функциями принадлежности $r_k(y)$, $k = 1, \dots, n$.

Алгоритм решения НСЛАУ следующий. По заданной НСЛАУ

$$A_{(n \times n)} X_{(n \times 1)} = Y_{n(n \times 1)}$$

с заданной матрицей A составляется расширенная система

$$S_{(2n \times 2n)} X_{(2n \times 1)} = Y_{n(2n \times 1)}$$

с блочной матрицей

$$S_{(2n \times 2n)} = \begin{bmatrix} B & C \\ C & B \end{bmatrix}_{(2n \times 2n)},$$

$$X = (\underline{X}; -\bar{X})^T, Y = (\underline{Y}; -\bar{Y})^T.$$

Матрицы B и C находятся по матрице A : матрица B состоит из положительных элементов матрицы A , а отрицательные элементы матрицы A заменяются соответственно нулями. Матрица C состоит из модулей отрицательных элементов матрицы A , а положительные элементы матрицы A заменяются соответственно нулями. Следовательно,

$$A = B - C \Rightarrow C = B - A.$$

При решении расширенной системы возникают следующие проблемы:

1. При каких условиях определитель $|S| \neq 0$?
2. Могут ли компоненты вектора X иметь функцию принадлежности в уровневой форме в виде треугольника, т.е. отличаться от нечеткого числа? Если такая ситуация возможна, то что тогда необходимо понимать под решением расширенной системы?

Ответ на вопрос по п. 1 дается с помощью следующей теоремы.

Теорема 1 (приводим без доказательства). $|S| \neq 0 \Leftrightarrow |B - C| \neq 0, |B + C| \neq 0$.

Проблема: если S не вырождена ($|S| \neq 0$), то как вычислить S^{-1} ?

Теорема 2 (приводим без доказательства). Если S^{-1} существует, то она должна иметь такую же структуру, что и S :

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} D & E \\ E & D \end{bmatrix}.$$

Теорема 3 (приводим без доказательства). В условиях теоремы 2 имеем:

$$D = 0,5[(B + C)^{-1} + (B - C)^{-1}];$$

$$E = 0,5[(B + C)^{-1} - (B - C)^{-1}].$$

Таким образом, если S не вырождена ($(B + C)$, $(B - C)$ не вырождены), то X — единственный вектор и он равен

$$X = S^{-1} Y_n.$$

Однако X может быть неподходящим нечетким вектором в том смысле, что функции принадлежности треугольного типа некоторых компонент вектора X могут иметь в основании треугольника углы больше 90° , т.е. не являются нечеткими числами. Например, пусть для фиксированного i получено:

$$x_i = (\underline{x}_i(r), \bar{x}_i(r)) \mid r \in [0; 1],$$

которое не является нечетким числом. Тогда выполняется замена $x_i \rightarrow u_i$,

$$u_i = \{\underline{u}_i(r) = \min(\underline{x}_i, \bar{x}_i, \underline{x}_i(r = 1))\},$$

$$\bar{u}_i(r) = \max(\underline{x}_i, \bar{x}_i, \underline{x}_i(r = 1)) \mid r \in [0; 1].$$

После такой замены $X \rightarrow U$.

Решение U называют "слабым" (weak) нечетким решением НСЛАУ.

Если же все компоненты вектора X являются нечеткими числами, т.е. углы при основании треугольной функции принадлежности меньше 90° , тогда найденный вектор X называют "сильным" (strong) нечетким решением НСЛАУ.

Теорема 4 (приводим без доказательства).
Для того, чтобы решение НСЛАУ

$$X = S^{-1}Y_H$$

имело "сильное" нечеткое решение, необходимо и достаточно, чтобы элементы $(S^{-1})_{ij} > 0$ для всех i, j .

Имеет место следующий факт. Матрица A НСЛАУ не вырождена, т. е. $|A| \neq 0$, однако матрица S расширенной НСЛАУ может быть вырождена, т. е. $|S| = 0$, и тогда расширенная НСЛАУ не имеет единственного решения. В этом случае НСЛАУ решается в соответствии с общей

теорией решения систем по методу Гаусса [13] путем приведения S к ступенчатому виду.

Поэтому возможны следующие варианты решения НСЛАУ.

Вариант 1. НСЛАУ при $|A| \neq 0, |S| = 0$ не имеет нечеткого решения.

Вариант 2. НСЛАУ при $|A| \neq 0, |S| = 0$ имеет бесконечное множество решений, из которых логично выделить "сильное" или "слабое" решения. Применительно к этому варианту будем иметь следующие типы нечетких решений:

— S решение: "сильное" (s) x_{SH}^S или "слабое" (w) x_{WH}^S соответственно;

— BF решение: "сильное" x_{SH}^{BF} или "слабое" x_{WH}^{BF} соответственно.

N. P. Demenkov, Ph. D., Associate Professor, dnp@bmstu.ru,

E. A. Mikrin, D. Sc., Professor, evgeny.mikrin@bmstu.ru,

I. A. Mochalov, D. Sc., Professor, intelsyst@mail.ru,

MSTU named after N. E. Bauman

Fuzzy Optimal Control of Linear Systems. Part 2. Program Control

When using the maximum principle to find the optimal control, it is necessary to solve a two-point boundary value problem for a system of ordinary differential equations, which is more complex than the initial one. However, in some important cases, for example, when optimizing linear systems with a quadratic functional, the two-point problem can be transformed to the Cauchy problem. Initially, the traditional problem is solved with the transfer of boundary conditions, and then after phasing of the parameters of the problem, the corresponding fuzzy problem is solve. When transferring conditions for a two-point boundary value problem from the left on the right end of the trajectory, the solution consists of the following steps. An initial task is formed on finding vectors of conjugate variables. An initial problem is defined for determining a transferable vector. A system of algebraic equations is solved for the state vector components missing at the right end. The transition to a fuzzy boundary-value problem is performed by fuzzing the elements (parameters) of the matrix for the classical problem and applying the expansion principle to it when its Seikkala and/or Buckley-Feuring solution is obtained using the transition matrix. The example is given.

Keywords: Fuzzy boundary value problems, the optimal synthesis of fuzzy controllers, fuzzy differential equations, membership functions, fuzzy initial problem, maximum principle, dynamic programming, the criterion of the generalized work

DOI: 10.17587/it.25.323-330

References

1. Demenkov N. P., Mikrin E. A., Mochalov I. A. *Informatsionnye Tekhnologii*, 2019, vol. 25, no. 5, pp. 259–270 (in Russian).
2. Moiseev N. N. Elements of the theory of optimal systems, Moscow, Nauka, 1975, 576 p. (In Russian).
3. Demenkov N. P. Computational aspects of solving optimal control problems, Moscow, Publishing house of MGTU im. N. Eh. Baumana, 2007, 171 p. (in Russian).
4. Filippov A. F. Collection of problems for differential equations, Moscow, Nauka, 1973, 128 p. (in Russian).
5. Agafonova S. A., German A. D., Muratova T. V. Differential equations, Moscow, Publishing house of MGTU im. N. Eh. Baumana, 2006, 347 p. (in Russian).
6. Kamke E. H. Handbook of ordinary differential equations, Moscow, Nauka, 1971, 576 p. (in Russian).
7. Abramov A. A. *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki*, 1961, vol. 1, no. 3, pp. 542–545 (in Russian).
8. Gantmaher F. R. Matrix Theory, Moscow, Nauka, 1967, 576 p. (in Russian).
9. Amir Sadeghi, Ahmad Izani Md. Ismail, Ali F. Jameel. *International Mathematical Forum*, 2011, vol. 6, no. 42, pp. 2087–2100.
10. Besekerskij V. A., Popov E. P. Theory of automatic control systems, Moscow, Nauka, 1975, 768 p. (in Russian).
11. Friedman M., Ming M., Kandel A. Fuzzy sets and systems, 1998, no. 96, pp. 201–209.
12. Mochalov I. A., Hrisat M. S. Estimating model parameters from fuzzy random data, *Informacionnye Tekhnologii*, 2014, no. 2(210), pp. 14–22 (in Russian).
13. Afanas'ev V. N., Kolmanovskij V. B., Nosov V. R. Mathematical theory of designing control systems, Moscow, Vysshaya shkola, 2003, 615 p. (in Russian).

А. С. Нефедов, аспирант, ассистент кафедры, e-mail: Domino1991@rambler.ru,
В. А. Шакиров, канд. техн. наук, декан, e-mail: mynovember@mail.ru,
 Братский государственный университет

Автоматизация процедуры заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критериям при использовании метода анализа иерархий

Рассматриваются основные этапы метода анализа иерархий, обсуждаются преимущества и недостатки. Предлагается модификация одного из этапов метода, связанная с заполнением матриц парных сравнений альтернатив по критериям. Новая процедура позволяет значительно снизить число запросов к лицу, принимающему решения, обеспечить высокую согласованность предпочтений, выраженных при парных сравнениях, учесть изменения предпочтений на протяжении всего оценочного интервала критерия. Применение модифицированной процедуры рассматривается на примере выбора площадки размещения электростанции.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, парные сравнения, модель предпочтений, оценка альтернатив

Введение

На текущий момент разработано свыше 70 методов многокритериального анализа [1–5], которые помогают лицу, принимающему решения (ЛПР), осуществлять выбор лучшей альтернативы. Можно разделить методы на следующие крупные группы: многокритериальная теория полезности MAUT (Multi-attribute utility theory); метод анализа иерархий АНР (Analytic hierarchy process); группа пороговых методов ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la REalite); методы вербального анализа решений; группа методов PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation).

Каждая группа методов имеет эффективную область применения в зависимости от числа альтернатив, критериев, способа описания критериев, полноты и точности информации. Метод АНР в настоящее время вырос в обширный междисциплинарный раздел теории принятия решений, имеющий убедительные математическое и психофизическое обоснования и многочисленные приложения. На основе АНР разработана широко известная программная система Expert Choice [6]. Более 40 лет АНР используется для поиска решений в самых различных профессиональных областях: промышленности, здравоохранении, образовании, энергетике и т. д. [7–10]. Для данного метода характерно иерархическое представление структуры анализируемой системы, элементы которой находятся во взаимосвязи друг с другом. При использовании данного ме-

тода происходит попарное сравнение критериев и альтернатив по критериям, затем определяются коэффициенты важности (локальные приоритеты) сравниваемых элементов, определяются итоговые приоритеты альтернатив и находится лучшее решение.

Оригинальный АНР, предложенный Т. Саати, на основе аддитивной свертки критериев и альтернатив имеет следующие достоинства [11, 12]:

- удобство для ЛПР парных сравнений альтернатив и критериев, возможность проверки согласованности ЛПР с помощью специального показателя;
- отсутствие необходимости назначения абсолютных оценок альтернативам;
- наличие шкалы, позволяющей оценивать как количественные, так и качественные величины;
- возможность работы с несколькими экспертами путем декомпозиции первоначальной задачи на подзадачи для конкретных экспертов в своих областях.

К недостаткам АНР можно отнести следующие:

- проблема согласованности суждений ЛПР при заполнении матриц парных сравнений при значительном числе альтернатив и критериев [12];
- проблема Rank reversal (изменение ранга) — изменение ранжирования альтернатив ввиду удаления или добавления новых альтернатив [3, 13–17];
- ограничение на число сравниваемых критериев и альтернатив до семи в связи с ростом загрузки ЛПР и несогласованности его ответов.

В ряде работ АНР подвергается критике за проблему rank reversal [13, 14, 17], а также за использование аддитивной свертки локальных показателей важности матриц парных сравнений альтернатив [18, 19]. Но также существует ряд работ, направленных на объяснение [16, 20–24] и устранение этих недостатков [13, 25, 26]. В частности, приводятся примеры, когда смена ранга при добавлении альтернативы закономерна. Для ситуаций, когда необходимо сохранение ранга, может использоваться модификация Ideal mode АНР [13], отличающаяся способом вычисления ценности локальных приоритетов.

Части указанных проблем также можно избежать при использовании мультипликативного АНР, предложенного Ф. Лутсмой [14, 27, 28]. Так, при заполнении матриц парных сравнений может быть обеспечена идеальная согласованность матриц парных сравнений альтернатив по критериям [29]. Проблема rank reversal для мультипликативного метода не характерна [14, 27]. Вместе с тем в работах [21, 22] мультипликативный АНР критикуется за вид свертки, который в ряде примеров приводит к неоднозначным результатам. Также мультипликативному АНР свойственна переоценка и недооценка альтернатив по критериям ввиду использования предложенной шкалы для субъективного измерения различных факторов.

В данной статье предлагается модификация одного из этапов оригинального АНР — заполнение матриц парных сравнений альтернатив по критериям, которая позволяет значительно снизить число запросов к ЛПР при обеспечении высокой согласованности, учитывает предпочтения ЛПР относительно оценок альтернатив по критериям на протяжении всего оценочного интервала. Проводится апробация модификации АНР на примере выбора площадки размещения электростанции.

1. Этапы оригинального метода анализа иерархий

АНР предполагает последовательную реализацию этапов выбора наилучшей альтернативы [11].

На первом этапе (рис. 1) происходит структуризация рассматриваемой задачи. ЛПР формулирует цель задачи и набор критериев K_1, \dots, K_n и альтернатив A_1, \dots, A_m . Проводится оценка альтернатив по критериям x_{11}, \dots, x_{nm} [11].

На втором этапе (рис. 1) формируются матрицы парных сравнений критериев и альтернатив. Для этого ЛПР предлагается с помо-

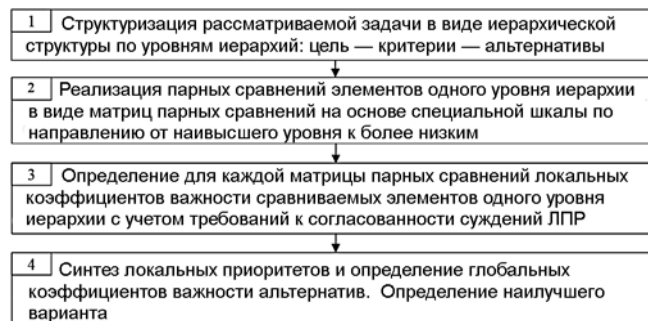


Рис. 1. Основные этапы реализации АНР

щью шкалы сравнительной важности (табл. 1) попарно оценить альтернативы по каждому из критериев, а также критерии между собой.

В результате попарной оценки формируются матрицы парных сравнений с оценками c_{ij} (табл. 2). Данные матрицы являются обратно симметричными.

Следующим этапом (рис. 1) является определение для каждой матрицы локальных коэффициентов важности сравниваемых элементов [11], например, для матрицы парных сравнений альтернатив по одному из критериев:

$$v_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^m d_i}, \quad (1)$$

где d_i — элемент собственного вектора матрицы.

Элемент собственного вектора матрицы, например, парных сравнений альтернатив [11] равен

$$d_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m c_{ij}}. \quad (2)$$

Таблица 1

Фундаментальная шкала для оценки силы суждений [11]

Степень важности	Оценка сравнительной важности элемента иерархии
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Существенное превосходство	5
Большое превосходство	7
Абсолютное превосходство	9

Таблица 2

Матрица парных сравнений альтернатив по критерию

	A_1	...	A_j	...	A_m
A_1	1	...	c_{1j}	...	c_{1m}
...
A_j	c_{j1}	...	c_{jj}	...	c_{jm}
...
A_m	c_{m1}	...	c_{mj}	...	1

Далее оценивается согласованность суждений ЛПР при реализации попарных сравнений. Под согласованностью понимается соблюдение на приемлемом уровне принципа, который соответствует количественному представлению транзитивности суждений ЛПР [12].

Для определения степени согласованности суждений ЛПР используют индекс согласованности [11]:

$$I_h = \frac{\lambda_{\max} - h}{h - 1}, \quad (3)$$

где h — число сравниваемых объектов; λ_{\max} — максимальное собственное значение матрицы парных сравнений.

Величина λ_{\max} определяется для каждого уровня иерархической структуры следующим образом [11]:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^h c_i d_i; \quad (4)$$

$$c_i = \sum_{j=1}^h c_{ij}. \quad (5)$$

Желательный уровень $I_h < 0,1$. Если значение не удовлетворяет уровню согласованности, ЛПР необходимо осуществить переоценку парных сравнений альтернатив или критериев.

На последнем этапе (рис. 1) проводится синтез локальных приоритетов и определяются показатели важности (глобальные приоритеты) каждой альтернативы [11]:

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij}, \quad (6)$$

где V_j — показатель важности j -й альтернативы; w_i — вес i -го критерия; v_{ij} — вес j -й альтернативы по i -му критерию.

Альтернатива с максимальным показателем важности считается лучшим решением.

Далее предлагается рассмотреть модификацию 2-го этапа (рис. 1) — реализацию парных сравнений альтернатив по критериям с помощью модифицированной процедуры.

2. Модифицированная процедура заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критерию

Заполнение матриц парных сравнений альтернатив по критериям является наиболее трудозатратным для ЛПР. Число запросов к ЛПР в оригинальном АНР при сравнении альтер-

натив по критериям определяется следующим выражением:

$$R = \left(\frac{m^2}{2} - \frac{m}{2} \right) n. \quad (7)$$

Ряд исследований был направлен на снижение загрузки ЛПР на этом этапе. В работе [30] предложена методика снижения числа парных сравнений путем неполного заполнения матриц парных сравнений. Основой подхода является допущение случаев, когда ЛПР не может выразить свои предпочтения по некоторым альтернативам. В исследовании [31] предлагался подход, в основе которого лежало закрепление отдельных частей иерархии за различными респондентами, с учетом того, что люди, которые проводят большое число сравнений, становятся менее последовательными. Т. Саати для снижения числа запросов к ЛПР предложил подход, основанный на формировании кластеров альтернатив [12, 32]. В работе [3] предложен способ построения матриц парных сравнений альтернатив по критерию на основе элементов первой строки, требующий выполнения $(m - 1)n$ запросов к ЛПР. В работах [33, 34] предложен подход, основанный на использовании однокритериальных функций ценности для выявления предпочтения в отношении альтернатив и заполнения матриц парных сравнений, требующий $3n$ запросов к ЛПР.

Предлагаемая в настоящей работе модификация заключается в построении модели предпочтений ЛПР в отношении пар оценок по критерию. Модель учитывает различную ценность для ЛПР оценок по критерию в начале и конце шкалы.

Шаг 1. ЛПР предоставляется возможность ознакомиться с фундаментальной шкалой для оценки силы суждений, представленной в табл. 1. При ознакомлении со шкалой ЛПР должен осознавать, что оценка сравнительной важности c_{ij} — это степень превосходства альтернативы с оценкой x_i над альтернативной с оценкой x_j по критерию.

Для формирования модели предпочтений ЛПР ему задаются следующие вопросы:

- оценки альтернатив по критерию изменяются от x_a до x_b . При этом оценка x_b превосходит оценку x_a с оценкой 9 по шкале (табл. 1). Пусть имеется альтернатива с оценкой x_a . Альтернатива с какой оценкой x'_a могла бы характеризоваться оценкой 3 по шкале (табл. 1) "умеренное превосходство" по отношению к x_a ? Ответ ЛПР определяет $\Delta x_1^3 = x'_a - x_a$;

- пусть имеется альтернатива с оценкой x_b . Альтернатива с какой оценкой x'_b могла бы характеризоваться оценкой "3" по отношению к x_b ? Ответ ЛПР определяет $\Delta x_2^3 = x'_b - x_b$. Второй вопрос позволяет проверить корректность суждений ЛПР относительно шкалы сравнительной важности (табл. 1). Если x'_a превосходит x_a с оценкой сравнительной важности "3", то x_b должна превосходить x'_a также с оценкой "3", так как x_b превосходит x_a в 9 раз. Поэтому если Δx_1^3 отличается от Δx_2^3 , ЛПР неточно выражает свои предпочтения, и неточность может количественно характеризоваться разницей между Δx_1^3 и Δx_2^3 .

Шаг 2. После выявления предпочтений ЛПР, соответствующих оценке "3", другие его предпочтения, соответствующие оценкам 5, 7, 9, определяются без его участия. Оценки определяются так же — относительно худшей и лучшей оценок x_a и x_b — с использованием следующей системы:

$$\begin{cases} x^1 = x_a; \\ x^3 = x^1 + \Delta x^3; \\ x^5 = x^3 + \Delta x^3 t; \\ x^7 = x^5 + \Delta x^3 t^2; \\ x^9 = x^7 + \Delta x^3 t^3 = x_b. \end{cases} \quad (8)$$

На основании ответов ЛПР могут быть построены модели предпочтений следующего характера, показанные на рис. 2.

При идеальном восприятии ЛПР шкалы сравнительной важности (табл. 1) и точных суждениях относительно пар сравниваемых альтер-

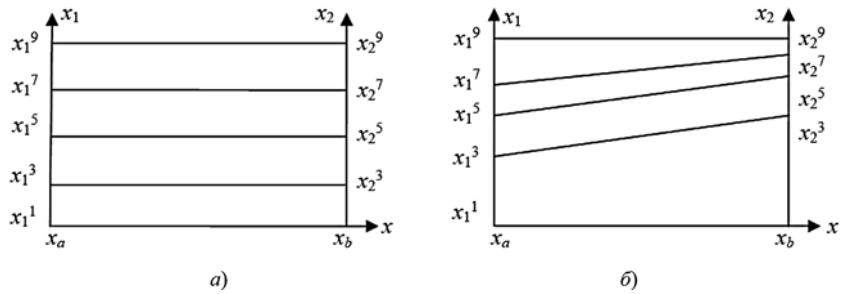


Рис. 2. Модель предпочтений ЛПР относительно пар сравниваемых альтернатив по критерию

натив в результате его ответов будет получено, что $x_1^3 = x_2^3$, и, соответственно, модель предпочтений будет характеризоваться рис. 2, а. Но также ввиду характера человеческого мышления может быть получена модель, представленная на рис. 2, б, которая выражает неточность суждений ЛПР относительно оценок сравниваемых альтернатив с использованием шкалы сравнительной важности. Дальнейшие этапы модифицированной процедуры предлагается рассматривать на примере идеализированной модели предпочтений ЛПР (рис. 2, а). Однако необходимо отметить, что все рассуждения могут быть распространены и на предпочтения, выражаемые моделью рис. 2, б. Итак, при выявлении предпочтений ЛПР вдоль шкалы критерия может быть получена одна из моделей предпочтений, показанных на рис. 3.

Шаг 3. Проводится сравнительная оценка пар альтернатив по критериям.

Элемент матрицы парных сравнений альтернатив x_i и x_j любого иерархического уровня определяется выражением [11]

$$c_{ij} = s(x_i)/s(x_j), \quad (9)$$

где $s(x_i)$, $s(x_j)$ — соответственно показатель сравнительной важности оценки x_i и x_j в от-

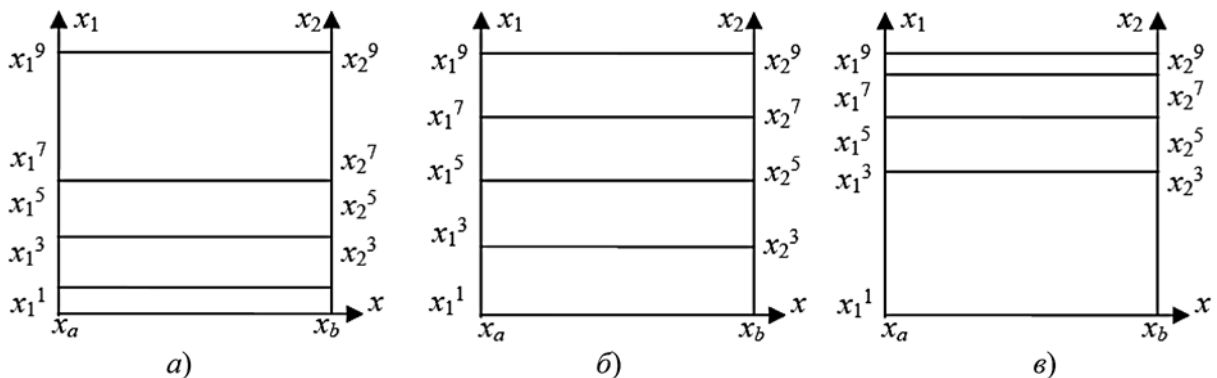


Рис. 3. Модели с различным характером предпочтений ЛПР вдоль шкалы критерия при сравнении пар альтернатив: а — при убывающих предпочтениях; б — при равных предпочтениях; в — при возрастающих

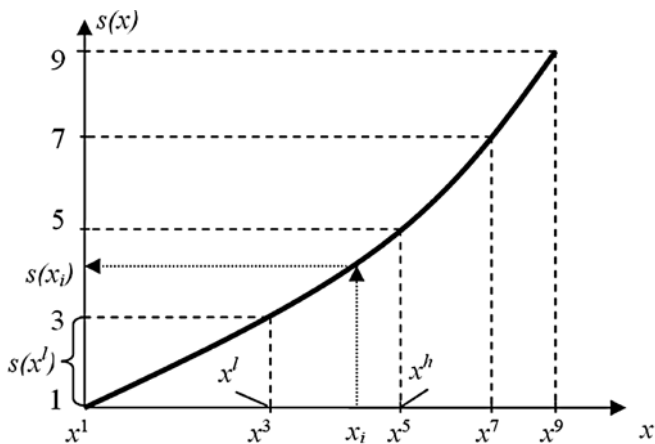


Рис. 4. Определение сравнительной важности альтернативы x_i

ношении x_a . Оценки $s(x_i)$, $s(x_j)$ определяются по формуле (рис. 4)

$$s(x_i) = s(x^l) + \frac{2(x_i - x^l)}{x^h - x^l}, \quad (10)$$

где $s(x^l)$ — оценка относительной важности, соответствующая оценке по критерию x^l ; x^l , x^h — оценки по критерию, определяемые выражением (8), такие что выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} x^l < x_i < x^h; \\ s(x^h) - s(x^l) = 2. \end{aligned} \quad (11)$$

Так, становится возможным определение оценок сравнительной важности $s(x_1), \dots, s(x_m)$ для m альтернатив и затем заполнение матрицы парных сравнений альтернатив по критерию на основании формулы (9) (табл. 3).

При определении c_{ij} по формуле (9) $s(x_1)$ играет роль "образца", с которым будут сравниваться остальные элементы $s(x_2), \dots, s(x_m)$. Данное заполнение матриц парных сравнений аналогично построению на основе элементов первой строки, предложенному в работе [3], при котором матрица будет всегда согласованной (индекс согласованности равен 0).

Таблица 3

Матрица парных сравнений альтернатив по критерию при использовании процедуры автоматизированного заполнения

	A_1	A_2	...	A_m
A_1	1	$c_{12} = s(x_1)/s(x_2)$...	$c_{1m} = s(x_1)/s(x_m)$
A_2	$c_{21} = s(x_2)/s(x_1)$	1	...	$c_{2m} = s(x_2)/s(x_m)$
...	1	...
A_m	$c_{m1} = s(x_m)/s(x_1)$	$c_{m2} = s(x_m)/s(x_2)$...	1

Модифицированный АНР позволяет значительно сократить число запросов к ЛПР и учесть предпочтения относительно оценок альтернатив по критериям в интервале оценок от x_a до x_b .

Число запросов к ЛПР для заполнения всех матриц парных сравнений альтернатив по критериям составляет $2n$, однако при реализации процедуры могут быть дополнительно заданы вопросы, позволяющие установить, что модель предпочтений сформирована корректно.

3. Применение автоматизированного заполнения матриц парных сравнений при выборе площадки размещения электростанции

В качестве иллюстрации применения автоматизированной процедуры заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критериям предлагается рассмотреть фрагменты решения следующей задачи. Предположим, что при участии ЛПР сформулированы следующие критерии оценки для выбора площадки размещения электростанции: K_1 — чистый дисконтированный доход (ЧДД) в результате строительства и эксплуатации электростанции на выбранной площадке в течение 5 лет; K_2 — экологическая эффективность площадки размещения электростанции; K_3 — социальная оценка в отношении выбранной площадки размещения электростанции.

В качестве альтернатив предлагаются площадки различной удаленности от населенного пункта в диапазоне от 5 до 50 км. Для рассмотрения ЛПР формируется набор альтернатив, представленный в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные для анализа

Альтернативы — удаленность, км	Чистый дисконтированный доход в результате эксплуатации электростанции, млн руб.	Экологическая эффективность, %	Социальная оценка, балл
5	620	20	4
15	470	40	6
25	340	60	8
35	260	80	9
50	90	100	10

Предположим, что при оценке альтернатив по критериям ЛПР руководствовался следующими положениями:

- по критерию "ЧДД станции" для ЛПР необходимо, чтобы прибыль от проекта составила не менее 500 млн руб., т. е. предпочтения ЛПР имеют возрастающий характер;
- при рассмотрении критерия "Экологическая эффективность" ЛПР удовлетворяют оценки станции, расположенной не менее чем в 20 км от населенного пункта, т. е. оцен-

ки экологической эффективности станции, расположенной ближе 20 км, имеют существенную значимость для ЛПР. Характер предпочтений ЛПР вдоль шкалы — убывающий.

Рассмотрим процесс формирования модели предпочтений ЛПР, формулировки запросов к нему и его ответы:

- по критерию "ЧДД станции" оценки альтернатив изменяются от 90 до 620 млн руб. Пусть имеется альтернатива с оценкой 90 млн руб. Альтернатива с какой оценкой могла бы характеризоваться оценкой "3" по шкале относительной важности (см. табл. 1) по отношению к альтернативе 90 млн руб.? Ответ ЛПР: 400 млн руб.;
- по критерию "ЧДД станции" какой должна быть альтернатива, чтобы по сравнению с ней оценка в 620 млн руб. имела оценку "3" по шкале (см. табл. 1)? Ответ ЛПР: 400 млн руб.;
- по критерию "Экологическая эффективность" оценки альтернатив изменяются от 20 до 100 %. Пусть имеется альтернатива с оценкой 20 %. Альтернатива с какой оценкой могла бы характеризоваться оценкой "3" по шкале относительной важности по отношению к альтернативе 20 %. Ответ ЛПР: 25 %;
- по критерию "Экологическая эффективность" какой должна быть альтернатива, чтобы по сравнению с ней альтернатива с оценкой 100 % имела оценку "3" по шкале относительной важности (см. табл. 1)? Ответ ЛПР: 25 %.

В результате ответов формируются модели предпочтений ЛПР относительно критериев. На рис. 5 сплошными линиями представлены соответствующие модели и графики оценок относительной важности. Штриховыми линиями показаны модели предпочтений и графики оценок для случая, когда предпочтения ЛПР вдоль шкалы критерия имеют линейный характер.

На основе данных моделей предпочтений (рис. 5) по формуле (9) формируются матрицы пар-

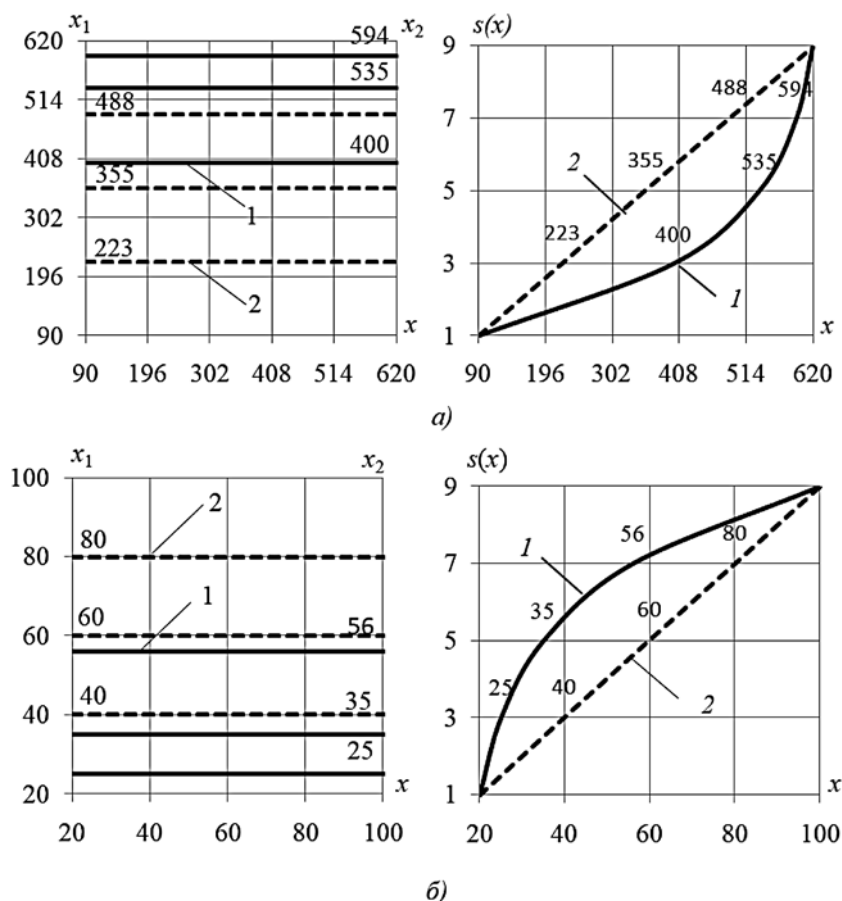


Рис. 5. Модели предпочтений ЛПР и графики зависимости оценок сравнительной важности от оценок по критериям: а — "ЧДД станции"; б — "Экологическое воздействие"

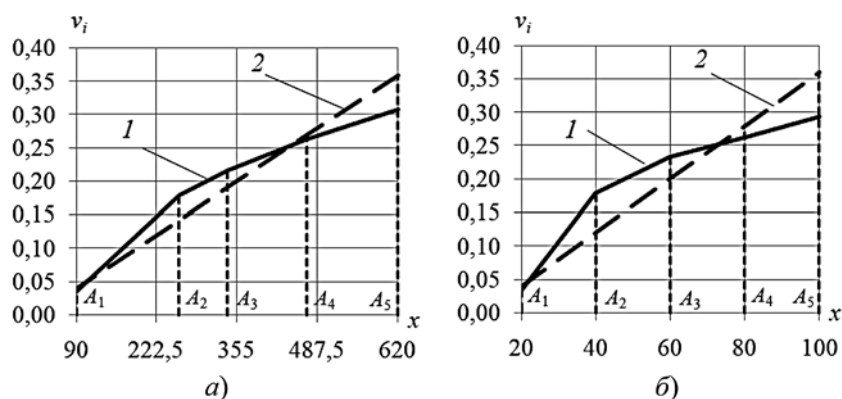


Рис. 6. Зависимость локальных приоритетов от оценок альтернатив по критериям: а — "ЧДД станции"; б — "Экологическая эффективность"

Матрица парных сравнений альтернатив по критерию "ЧДД станции"

K_1	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Локальные приоритеты (v_i)	λ_{\max}	I_h
A_1	1	2,23	3,44	4,29	9,00	0,4801	5	0
A_2	0,45	1	1,55	1,93	4,04	0,2153		
A_3	0,29	0,65	1	1,25	2,61	0,1394		
A_4	0,23	0,52	0,80	1	2,10	0,1118		
A_5	0,11	0,25	0,38	0,48	1	0,0533		

Таблица 6

Матрица парных сравнений альтернатив по критерию "Экологическое воздействие"

K_2	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Локальные приоритеты (v_i)	λ_{\max}	I_h
A_1	1	0,18	0,14	0,12	0,11	0,0325	5	0
A_2	5,48	1	0,76	0,68	0,61	0,1781		
A_3	7,18	1,31	1	0,89	0,80	0,2336		
A_4	8,09	1,48	1,13	1	0,90	0,2631		
A_5	9,00	1,64	1,25	1,11	1	0,2927		

Таблица 7

Матрица парных сравнений альтернатив по критерию "ЧДД станции" при линейном характере предпочтений ЛПП

K_1	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Локальные приоритеты (v_i)	λ_{\max}	I_h
A_1	1	1,33	1,88	2,52	9,00	0,3585	5	0
A_2	0,75	1	1,41	1,89	6,74	0,2686		
A_3	0,53	0,71	1	1,34	4,79	0,1907		
A_4	0,40	0,53	0,75	1	3,58	0,1424		
A_5	0,11	0,15	0,21	0,28	1	0,0398		

Таблица 8

Матрица парных сравнений альтернатив по критерию "Экологическое воздействие" при линейном характере предпочтений ЛПП

K_2	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Локальные приоритеты (v_i)	λ_{\max}	I_h
A_1	1	0,33	0,20	0,14	0,11	0,04	5	0
A_2	3,00	1	0,60	0,43	0,33	0,12		
A_3	5,00	1,67	1	0,71	0,56	0,2		
A_4	7,00	2,33	1,40	1	0,78	0,28		
A_5	9,00	3,00	1,80	1,29	1	0,36		

ных сравнений по критериям в первом случае (табл. 5, 6) и во втором случае — при линейном характере предпочтений (табл. 7, 8).

Проведем сравнительный анализ полученных локальных приоритетов в первом и во втором случаях (рис. 6).

На рис. 6 видно, что при линейной структуре предпочтений наблюдается линейная зависимость локальных приоритетов от оценок альтернатив (графики 2). При нелинейной структуре предпочтений, рассмотренных в первом случае, зависимость локальных приоритетов отражает соответствующие предпо-

чтения (графики 1). Так, улучшение оценок в начале шкалы критерия "Экологическая эффективность" сказывается на оценке сравнительной важности в большей мере, чем улучшение оценок в конце шкалы. По критерию "ЧДД станции" наблюдается противоположная зависимость.

При использовании процедуры автоматизированного заполнения матриц парных сравнений альтернатив по трем критериям потребовалось шесть запросов к ЛПП. При использовании стандартной процедуры потребуется 30 запросов.

Заклучение

В статье были рассмотрены разновидности метода АНР, показаны их достоинства и недостатки, рассмотрены основные этапы оригинального АНР.

Предложена модификация одного из этапов оригинального АНР — процедура автоматизированного заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критериям, которая позволяет значительно снизить число запросов к ЛПР при обеспечении высокой согласованности, а также учитывает предпочтения ЛПР относительно оценок альтернатив по критериям на протяжении всего оценочного интервала.

Представлен пример использования процедуры автоматизированного заполнения матриц парных сравнений на примере отдельных фрагментов задачи многокритериального выбора площадки размещения электростанции.

Предложенная процедура автоматизированного заполнения матриц парных сравнений может использоваться при построении систем поддержки принятия решений в различных областях.

Список литературы

1. **Кравченко Т. К., Дружаев А. А.** Адаптация методов семейства ELECTRE для включения в экспертную систему поддержки принятия решений // Бизнес-информатика. 2015. № 2 (32). С. 69—78.
2. **Рыбак В. А., Шокр А.** Аналитический обзор и сравнение существующих технологий поддержки принятия решений // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 3. С. 12—18.
3. **Ногин В. Д.** Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. Т. 44. № 7. С. 1261.
4. **Sun X.** Multiple criteria decision analysis techniques in aircraft design and evaluation processes: Diss. ... Dr.-Ing. / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Lufttransportsysteme, Hamburg. Köln: DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, 2013. 181 p.
5. **Aouam T., Chang S. I., Lee E. S.** Fuzzy MADM: An outranking method // European Journal of Operational Research. 2003. Vol. 145. P. 317—328.
6. **Ishizaka A., Labib A.** Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations // ORInsight. 2009. N. 22(4). P. 201—220.
7. **Li B., Chang X.** Application of Analytic Hierarchy Process in the Planning of Energy Supply Network for Electric Vehicles // Energy Procedia. 2011. N. 12. P. 1083—1089.
8. **Amiri M. P.** Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. Expert Systems with Applications. 2010. N. 37(9). P. 6218—6224.
9. **Saracoglu B. O.** "Selecting industrial investment locations in master plans of countries" // European Journal of Industrial Engineering. Inderscience Enterprises Ltd. 2013. N. 7 (4). P. 416—441.

10. **Fabio De Felice, Antonella Petrillo, Thomas Saaty.** Applications and Theory of Analytic Hierarchy Process. Publisher: InTech, Chapters published, August 31, 2016. 320 p.
11. **Петровский А. Б.** Теория принятия решений. М.: Издательский центр "Академия", 2009. 400 с.
12. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
13. **Belton V., Gear T.** On a Short-Coming of Saaty's Method of Analytic Hierarchies // Omega. 1983. Vol. 11.
14. **Triantaphyllou E.** Two New Cases of Rank Reversals when the AHP and Some of its Additive Variants are Used that do not Occur with the Multiplicative AHP // Journal Of Multi-Criteria Decision Analysis. 2001. Vol. 10. P. 11—25.
15. **Saaty T. L.** Axiomatic foundations of the analytic hierarchy process // Management Science. 1983. Vol. 32. P. 841—855.
16. **Saaty T. L.** Rank generation, preservation, and reversal in the analytic hierarchy process // Decision Sciences. 1987. Vol. 18. P. 157—177.
17. **Dyer J. S.** Remarks on the analytic hierarchy process // Management Science. 1990. Vol. 36. P. 249—258.
18. **Подinovский В. В., Подinovская О. В.** О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 8—13.
19. **Подinovский В. В., Подinovская О. В.** Еще раз о некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 75—78.
20. **Saaty T. L., Vargas L. G.** The legitimacy of rank reversal // Omega. 1984. Vol. 12, Iss. 5. P. 513—516.
21. **Saaty T. L.** Making and validating complex decisions with the AHP/ANP // Journal of Systems Science and Systems Engineering. 2005. Vol. 14, Iss. 1. P. 1—36.
22. **Vargas L. G.** Comments on Barzilai and Lootsma. Why the Multiplicative AHP Is Invalid: A Practical Counterexample // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. 1997. Vol. 6. P. 169—170.
23. **Tversky A., Simonson L.** Context-dependent preferences // Manag. Set. 1994. N. 39. P. 1124—1131.
24. **Митихин В. Г.** К вопросу анализа задач принятия решения с иерархической структурой // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 8—2 (39). С. 110—114.
25. **Покровский А. М.** К вопросу о корректности метода анализа иерархий в сравнительной оценке инновационных проектов // Экономика, статистика и информатика // Вестник УМО. 2010. № 5. С. 137—143.
26. **Ying-Ming Wang, Taha M. S.** Elhag. An approach to avoiding rank reversal in AHP // Decision Support Systems. December 2006. Vol. 42, Iss. 3. P. 1474—1480.
27. **Lootsma F. A.** Scale Sensitivity in the Multiplicative AHP and SMART // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. 1993. Vol. 2. P. 87—110.
28. **Lootsma F. A.** Context-Related Scaling of Human Judgment in the Multiplicative AHP, SMART, and ELECTRE // IIASA Working Paper. IIASA, Laxenburg, Austria: WP-93-039. 1993.
29. **Keeney R., Raiffa H.** Decisions with Multiple Objectives; Preferences and Values Tradeoffs. New York: Wiley, 1976.
30. **Harker P. T.** Alternative modes of questioning in the analytic hierarchy process // Mathematical Modelling. 1987. Vol. 9. P. 41—46.
31. **Weiss E. N., Rao V. R.** AHP design issues for large-scale systems // Decision Science. 1987. Vol. 8. P. 43—68.
32. **Islam R., Biswal M. P., Alam S. S.** Clusterization of alternatives in the analytic hierarchy process // Military Operations Research. 1997. Vol. 3. N. 1. P. 69—78.
33. **Шакиров В. А., Панкратьев П. С.** Выбор пункта строительства электростанции в условиях риска методом анализа иерархий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4 (44). С. 141—147.
34. **Шакиров В. А., Панкратьев П. С.** Поддержка принятия решений на стадии предпроектных исследований на основе двухуровневого многокритериального анализа // Прикладная информатика. 2013. № 6 (48). С. 111—121.

A. S. Nefedov, Assistant at the Department of Industrial heat and power engineering,
e-mail: Domino1991@rambler.ru,

V. A. Shakirov, Dean of faculty of Energy engineering and automation, e-mail: mynovember@mail.ru.
Bratsk State University (BrSU), Bratsk, 665709, Russian Federation

Automation of the Procedure for Filling Matrices of Pairwise Comparison of Alternatives by Criteria when using the Analytic Hierarchy Process

The main stages of analytic hierarchy process are considered, advantages and disadvantages are presented. A modification of one of the stages of the method is proposed. It is associated with filling in the matrices of pairwise comparisons of alternatives by criteria. The modification consists in constructing a model of preferences of the decision maker regarding pairs of evaluations by criterion, taking into account different values for the decision maker, evaluations by criterion at the beginning and end of the scale. A preference model is formed on the basis of a comparison of one pair of alternatives according to the criterion by which the preferences match with the assessment of the scale of relative importance. The answer obtained allows us to make an assumption that the scale scores correspond to other pairwise comparisons of alternatives by criterion. The new procedure allows to significantly reduce the number of requests to the decision maker, to ensure a high consistency of preferences expressed in pairwise comparisons, to take into account changes in preferences throughout the entire evaluation interval of the criterion. The application of the modified procedure is considered on the example of choosing the site for a power plant.

Keywords: analytic hierarchy process, pair comparisons, model of preferences, evaluation of alternatives.

DOI: 10.17587/it.25.331-339

References

1. Kravchenko T. K., Druzhaev A. A. *Biznes-informatika*, 2015, no. 2(32), pp. 69–78 (in Russian).
2. Rybak V. A., Shokr A. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika*, 2016, no. 3, pp. 12–18 (in Russian).
3. Nogin V. D. *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki I Matematicheskoi Fiziki*, 2004, vol. 44, no. 7, pp. 1194–1202 (in Russian).
3. Sun X. Multiple criteria decision analysis techniques in aircraft design and evaluation processes: Diss. ... Dr.-Ing. / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Lufttransportsysteme, Hamburg, Köln: DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, 2013, 181 p.
5. Aouam T., Chang S. I., Lee E. S. *European Journal of Operational Research*, 2003, vol. 145, pp. 317–328.
6. Ishizaka A., Labib A. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations, *ORInsight*, 2009, no. 22(4), pp. 201–220.
7. Li B., Chang X. *Energy Procedia*, 2011, no. 12, pp. 1083–1089.
8. Amiri M. P. *Expert Systems with Applications*, 2010, no. 37(9), pp. 6218–6224.
9. Saracoglu B. O. *European Journal of Industrial Engineering*. Inderscience Enterprises Ltd., 2013, no. 7 (4), pp. 416–441.
10. Fabio De Felice, Antonella Petrillo, Thomas Saaty. Applications and Theory of Analytic Hierarchy Process, Publisher: InTech, Chapters published August 31, 2016, 320 p.
11. Petrovskii A. B. Decision-making theory, Moscow, Publishing Center "Academy", 2009, 400 p. (in Russian).
12. Saaty T. The analytic hierarchy process, Moscow, Radio and communication, 1993, 278 p.
13. Belton V., Gear T. *Omega*, 1983, vol. 11.
14. Triantaphyllou E. *Journal Of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2001, vol. 10, pp. 11–25.
15. Saaty T. L. *Management Science*, 1983, vol. 32, pp. 841–855.
16. Saaty T. L. *Decision Sciences*, 1987, vol. 18, pp. 157–177.
17. Dyer J. S. *Management Science*, 1990, vol. 36, pp. 249–258.
18. Podinovskii V. V., Podinovskaya O. V. *Problemy Upravleniya*, 2011, no. 1, pp. 8–13 (in Russian).
19. Podinovskii V. V., Podinovskaya O. V. *Problemy Upravleniya*, 2012, no. 4, pp. 75–78 (in Russian).
20. Saaty T. L., Vargas L. G. *Omega*, 1984, vol. 12, iss. 5, pp. 513–516.
21. Saaty T. L. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2005, vol. 14, iss. 1, pp. 1–36.
22. Vargas L. G. *Journal Of Multi-Criteria Decision Analysis*, 1997, vol. 6, pp. 169–170.
23. Tversky A., Simonson L. *Manag. Set.*, 1994, no. 39, pp. 1124–1131.
24. Mitikhin V. G. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2015, no. 39, pp. 110–114.
25. Pokrovskii A. M. *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO*, 2010, no. 5, pp. 137–143 (in Russian).
26. Ying-Ming Wang, Taha M. S. *Decision Support Systems*, December 2006, vol. 42, iss. 3, pp. 1474–1480.
27. Lootsma F. A. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 1993, vol. 2, pp. 87–110.
28. Lootsma F. A. Context-Related Scaling of Human Judgment in the Multiplicative AHP, SMART, and ELECTRE. IIASA Working Paper. IIASA, Laxenburg, Austria, 1993, WP-93-039.
29. Keeney R., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives; Preferences and Values Tradeoffs, Wiley, New York, 1976.
30. Harker P. T. *Mathematical Modelling*, 1987, vol. 9, pp. 41–46.
31. Weiss E. N., Rao V. R. *Science*, 1987, vol. 8, pp. 43–68.
32. Islam R., Biswal M. P., Alam S. S. *Military Operations Research*, 1997, vol. 3, no. 1, pp. 69–78.
33. Shakirov V. A., Pankrat'ev P. S. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*, 2014, no. 44, pp. 141–147 (in Russian).
34. Shakirov V. A., Pankrat'ev P. S. *Prikladnaya Informatika*, 2013, no. 48, pp. 111–121 (in Russian).

В. И. Левин, д-р техн. наук, проф., e-mail: vilevin@mail.ru,
Пензенский государственный технологический университет

Непрерывная логика и анализ надежности сложных систем. Исследование некоторых классов систем

В последние годы все большее внимание ученых и проектировщиков технических систем приобретают вопросы совершенствования методов оценки надежности и безопасности этих систем, связанные с задачами повышения значений этих характеристик. Цель статьи заключается в разработке автоматически-логической модели надежности сложных технических систем и соответствующих логических методов оценки надежности таких систем, которые в отличие от известных используют не традиционные вероятностные показатели надежности, а детерминированные логические показатели. Для достижения поставленной цели в статье предложено использовать в качестве исходных данных наблюдаемые моменты последовательных отказов и восстановлений элементов технической системы, а в качестве характеристик надежности самой системы — моменты последовательных отказов и восстановлений данной системы. В этом случае задача оценки надежности системы сводится к построению ее математической модели в виде автоматных логических функций, выражающих моменты ее последовательных отказов и восстановлений через аналогичные моменты всех ее элементов. Настоящая статья представляет собой вторую часть работы, в которой детально разрабатывается автоматически-логическая модель, предназначенная для вычисления логической функции надежности сложных технических систем. Новизна работы заключается в построении адекватной логической модели надежности сложной системы, позволяющей свести оценку надежности сложной технической системы к вычислению ее логических функций надежности. В процессе вычислений впервые используется математический аппарат логических определителей, что и позволяет решить проблему сложности. В статье детально разработаны логическая модель надежности и методы ее исследования, позволяющие вводить новые показатели надежности сложных технических систем, не требующие для своей оценки использования вероятностных методов и исходных статистических данных об отказах элементов. На основе разработанной логической модели надежности и методов ее исследования решена задача построения автоматной модели надежности систем, которая позволит вести практические расчеты сложных технических систем методами теории динамических автоматов с помощью аппарата логических определителей.

Ключевые слова: сложная система, переключательный процесс, надежный процесс, динамический автомат, двоичный оператор, структура оператора, логическая теория надежности

Введение

В предыдущей работе [1] было показано, что использование в теории надежности математической логики вместо традиционного вероятностного подхода открывает новые возможности в исследовании надежности технических систем. В развитие этой идеи был подробно описан математический аппарат создаваемой автором логической теории надежности сложных систем. Этот аппарат так называемых логических определителей играет ту же роль укрупненного (блочного) описания с точки зрения надежности изучаемых нелинейных систем, что и обычные определители при изучении линейных систем [2, 3]. В этой статье, являющейся продолжением работы [1], строится и детально описывается автоматная математическая модель для оценки характеристик надежности сложных систем. Подробно изложена методика исследования и расчета

надежности таких систем с помощью аппарата логических определителей. При изложении использованы результаты работ [1—4]. Предлагаемый автором подход к оценке надежности сложных систем не имеет аналогов как в классической научной литературе по надежности, так и в современной [5—15].

1. Надежность симметрических систем

Изучим методом эквивалентных схем ([3], § 9) надежность класса систем без памяти, у которых симметрические функции работоспособности (ФР), а надежные процессы (НП) в блоках и на входах произвольны. *Симметричность* ФР означает, что надежное состояние (НС) любого выхода системы определяется лишь общим числом блоков (входов), НС которых равны 0 и 1, но не зависит от того, какие именно это блоки. К этому классу при-

надлежат, например, параллельные и последовательные системы ([3], § 11, 12). Обратимся к общей схеме-модели надежности системы ([3], § 9). В ней без ограничения общности можно опустить ступень 1 (задержки) и внешние входы, а из r выходов оставить какой-нибудь один. В результате получим $(n, 1)$ -полюсник, реализующий на выходе симметрическую булеву функцию своих входов

$$y = f(a_1, \dots, a_n). \quad (1.1)$$

Воздействия $a_1(t), \dots, a_n(t)$ на его входах — НП в блоках изучаемой системы, реакция $y(t)$ — НП в системе. Найдем $y(t)$ по заданным $a_1(t), \dots, a_n(t)$.

Любую симметрическую функцию f от n переменных (1.1) можно конкретизировать как симметрическую функцию $f_n^{p_1 \dots p_r}$ с некоторым набором индексов p_1, \dots, p_r . По определению $f_n^{p_1 \dots p_r} = 1$, если ровно p_1 или... или ровно p_r из n переменных (безразлично каких) равны единице. Выделим фундаментальную симметрическую функцию $f_n^p = 1$ индекса p от n переменных. По определению $f_n^p = 1$ если ровно p из n переменных (безразлично каких) равны 1. Ясно, что

$$f_n^{p_1 \dots p_r} = \bigvee_{i=1}^r f_n^{p_i}. \quad (1.2)$$

Согласно (1.2) $(n, 1)$ -полюсник — модель нашей системы — можно заменить эквивалентной двухступенчатой схемой. Ступень 1 содержит r параллельно соединенных элементов, реализующих симметрические функции $f_n^{p_i}, i = 1, \dots, r$, от одного и того же множества переменных a_1, \dots, a_n ; ступень 2 — один дизъюнктор, входы которого — это выходы ступени 1. В качестве стандартных примем воздействия на схему вида (52) [3], начинающиеся и оканчивающиеся импульсами (блоки в момент $t_0 = 0$ неработоспособны, затем восстанавливаются, отказывают, ..., окончательно отказывают).

Найдем реакцию $y_n^p(t)$ любого элемента f_n^p ступени 1 на указанные воздействия. В силу симметричности функции f_n^p эти воздействия можем заменить эквивалентной совокупностью M свободных импульсов

$$x^{(r)}(t) = 1(A^r, B^r), \quad r = 1, \dots, M, \quad M = \sum_{i=1}^n m_i \quad (1.3)$$

с моментами A^r, B^r начала и окончания вида (56) [3], упорядоченных таким образом, что импульс с большим номером начинается

(оканчивается) позже импульса с меньшим номером (см. [3], § 8). Число пересекающихся импульсов (1.3) в любой момент t совпадает с этим числом для совокупности входных процессов схемы (52) [3] и не превосходит n . Элемент f_n^p имеет значение выхода $y = 1$ в момент t , если в этот момент имеется ровно p единиц на n его входах, т. е. пересекаются p импульсов импульсной последовательности (53) [3]. При этом так пересекаться может каждая пачка из p последовательных импульсов (1.3):

$$1(A^k, B^k), \dots, 1(A^{k+p-1}, B^{k+p-1}), \quad (1.4)$$

$$k = 1, \dots, M - p + 1.$$

Пересечение всех p импульсов (1.4) в силу их упорядоченности происходит, если первый импульс оканчивается позже, чем начинается p -й импульс. Поэтому каждой k -й пачке импульсов (1.4), если не учитывать ее взаимодействие с другими пачками импульсов, соответствует фрагмент искомой реакции

$$y_k(t) = \begin{cases} 1(A^{k+p-1}, B^k) & \text{при } A^{k+p-1} < B^k; \\ 0 = 1(B^k, B^k) & \text{при } A^{k+p-1} \geq B^k, \end{cases}$$

или в терминах непрерывной логики (НЛ)

$$y_k(t) = 1(B^k A^{k+p-1}, B^k), \quad k = 1, \dots, M - p + 1. \quad (1.5)$$

Учтем взаимодействие различных пачек импульсов. Рассмотрим две соседние пачки — k -ю и $(k + 1)$ -ю. Если они не взаимодействуют, то соответствующие им два выходных импульса (1.5) y_k и y_{k+1} не пересекаются, и реакция элемента на две выбранные пачки импульсов образуется парой разделенных во времени импульсов y_k и y_{k+1} . Взаимодействие этих двух пачек импульсов проявляется в пересечении импульсов y_k, y_{k+1} на некотором интервале (a, b) , что означает пересечение на интервале (a, b) всех импульсов k -й и $(k + 1)$ -й пачек, т. е. всех $p + 1$ импульсов объединенной пачки. Значит, в интервале (a, b) на $p + 1$ из n входов элемента f_n^p действуют единицы, а на его выходе получается $y = 0$. Таким образом, эффект взаимодействия соседних k -й и $(k + 1)$ -й пачек импульсов (1.4) приводит к объединению их реакций y_k и y_{k+1} (1.5) в одну $y_{k, k+1}$ по правилу

$$y_{k, k+1}(t) = \begin{cases} 1(B^k A^{k+p-1}, B^k) 0(-, -) 1(B^{k+1} A^{k+p}, B^{k+1}) & \text{при } B^k \leq B^{k+1} A^{k+p}; \\ 1(B^k A^{k+p-1}, B^{k+1} A^{k+p}) 0(-, -) 1(B^k, B^{k+1}) & \text{при } B^k > B^{k+1} A^{k+p}, \end{cases}$$

или в терминах НЛ с учетом очевидного неравенства $B^k \leq B^{k+1}$

$$y_{k,k+1}(t) = 1(B^k A^{k+p-1}, B^k A^{k+p}) \dots \dots 0(-, -)1(B^k \vee B^{k+1} A^{k+p}, B^{k+1}). \quad (1.6)$$

Здесь запись $0(-, -)$ означает, что нулевая пауза начинается в момент окончания соседнего слева единичного импульса и оканчивается в момент начала соседнего справа единичного импульса.

Взаимодействие несоседних пачек импульсов (1.4) специально не учитываем, ибо в интервале пересечения соответствующих выходных импульсов (1.5) появляется тот же сигнал $y = 0$, что и для соседних пачек, а сам интервал — часть аналогичного интервала для некоторых соседних пачек.

Итак, реакция элемента f_n^p на стандартные воздействия вида (52) [3] есть последовательность импульсов (1.5), сжатых (ср. (1.5) с (1.6)) согласно преобразованию

$$\begin{aligned} B^k &\rightarrow B^k A^{k+p}, \quad k = 1, \dots, M-p; \\ B^k A^{k+p-1} &\rightarrow B^{k-1} \vee B^k A^{k+p-1}, \\ k &= 2, \dots, M-p+1, \end{aligned} \quad (1.7)$$

и ставших в результате непересекающимися. Преобразование (1.7) есть замена момента начала каждого импульса (1.5) (кроме первого) его дизъюнкцией НЛ с моментом окончания соседнего слева импульса и момента окончания каждого импульса (1.5) (кроме последнего) его конъюнкцией НЛ с моментом начала соседнего справа импульса. Окончательно реакция элемента f_n^p на воздействия вида (52) [3] такова:

$$\begin{aligned} y_n^p(t) &= 1(B^1 A^p, B^1 A^{p+1})0(-, -) \dots \\ &\dots 1(B^1 \vee B^2 A^{p+1}, B^2 A^{p+2}) \dots \\ &\dots 1(B^{M-p-1} \vee B^{M-p} A^{M-1}, B^{M-p} A^M)0(-, -) \dots \\ &\dots 1(B^{M-p} \vee B^{M-p+1} A^M, B^{M-p+1}), \end{aligned} \quad (1.8)$$

где A^r и B^r из соотношения (56) [3]. Из выражения (1.8) видно, что реакция — процесс того же вида, что и воздействия, и имеет до $M-p+1$ импульсов ($M-p$ пауз).

Согласно (1.2) реакцию $y_n^{p_1 \dots p_r}(t)$ на выходе схемы-модели можно вычислить как реакцию r -входного дизъюнктора (ступень 2 схемы) на воздействия, являющиеся выходными процессами элементов $f_n^{p_1}, \dots, f_n^{p_r}$ с входными воздействиями вида (52) [3]; последние можно определить по формуле (1.8) при $p = p_1, \dots, p_r$. Но реак-

ция дизъюнктора с n входами на произвольные воздействия вида (52) [3], начинающиеся и оканчивающиеся импульсами, находится по формуле (72) [3]. Теперь для получения $y_n^{p_1 \dots p_r}(t)$ осталось лишь уточнить выражение (72) [3], учитывая, что в данном случае дизъюнктор имеет r входов, а воздействия на него — не процессы (52) [3], а процессы (1.8) при $p = p_1, \dots, p_r$. Окончательно реакция n -входовой схемы-модели с симметрической функцией $f_n^{p_1 \dots p_r}$ на входные воздействия (52) [3]

$$y_n^{p_1 \dots p_r}(t) = 1(\bar{A}^1, \bar{B}^1 \bar{A}^2)0(-, -)1(\bar{A}^2, \bar{B}^2 \bar{A}^3) \dots \dots 1(\bar{A}^{N-1}, \bar{B}^{N-1} \bar{A}^N)0(-, -)1(\bar{A}^N, \bar{B}^N). \quad (1.9)$$

Здесь \bar{A}^s и \bar{B}^s — логические определители (ЛО) вида

$$\begin{aligned} \bar{A}^s &= \left[\frac{(B^1 A^{p_1})(B^1 \vee B^2 A^{p_1+1}) \dots^{(s)}}{\dots (B^{M-p_1} \vee B^{M-p_1+1} A^M)} \right] \\ \bar{B}^s &= \left[\frac{(B^1 A^{p_1+1}) \dots (B^{M-p_1} A^M) B^{M-p_1+1}}{(B^1 A^{p_r+1}) \dots (B^{M-p_r} A^M) B^{M-p_r+1}} \right]^{(s)}, \quad (1.10) \\ s &= 1, \dots, N, \end{aligned}$$

с ЛО A^r и B^r из (56) [3]; N — число имеющихся импульсов в r процессах (1.8) с $p = p_1, \dots, p_r$, т. е.

$$N = \sum_{i=1}^r (M - p_i + 1) = (M + 1)r - \sum_{i=1}^r p_i. \quad (1.11)$$

Итак, НП в произвольной системе с симметрической ФР $f_n^{p_1 \dots p_r}$ и n блоками, имеющими НП вида (52) [3], в общем случае есть восстановление начальной работоспособности системы и последующая ее эксплуатация до исчерпания ресурса. Ресурс системы — N восстановлений — выражается через суммарный ресурс всех блоков $M = \sum_{i=1}^n m_i$ по формуле (1.11); интервалы работоспособности системы $(\bar{A}^s, \bar{B}^s \bar{A}^s)$, $s = 1, \dots, N-1$; (\bar{A}^N, \bar{B}^N) . Первое изменение НС системы — восстановление в момент \bar{A}^1 , первый отказ — в момент $B^1 \bar{A}^2$, последний (окончательный) отказ — в момент \bar{B}^N .

Из базовой реакции (1.9) схемы-модели на стандартные воздействия вида (52) [3] можно найти ее реакции на любые воздействия. Найдем, например, ее реакцию на воздействия вида (73) [3]. Представим эти воздействия в стандартном виде (74) [3]. Реакция на воздей-

ствия вида (74) [3], вычисляется согласно выражениям (1.9)—(1.11) при замене $M \rightarrow M + n$ и ЛО A^r и B^r из (75) [3]. В силу $p_1 \leq n, \dots, p_r \leq n$ элементы 1-го столбца ЛО \bar{A}^s суть $-\infty$, так что $\bar{A}^1 = \dots = \bar{A}^r = -\infty$ и первые r импульсов в (1.9) сливаются в один с началом $-\infty$. Выполнив нужные преобразования ([3], § 11, 12), найдем искомую реакцию n -входовой схемы-модели с функцией $f_n^{p_1 \dots p_r}$ на воздействия вида (73) [3]:

$$y_n^{p_1 \dots p_r}(t) = 0(\bar{B}^r \bar{A}^1, -)1(\bar{A}^1, \bar{B}^{r+1} \bar{A}^2) \dots \dots 1(\bar{A}^{N-1}, \bar{B}^{N+r-1} \bar{A}^N)0(-, -)1(\bar{A}^N, \bar{B}^{N+r}), \quad (1.12)$$

где \bar{A}^s и \bar{B}^s — ЛО вида

$$\bar{A}^s = \left| \begin{array}{c} (B^1 \vee B^2 A^{p_1-n+1}) \dots \\ \dots (B^{M+n-p_1} \vee B^{M+n-p_1+1} A^M) \\ \hline (B^1 \vee B^2 A^{p_r-n+1}) \dots \\ \dots (B^{M+n-p_r} \vee B^{M+n-p_r+1} A^M) \end{array} \right|^{(s)}, \quad (1.13)$$

$$\bar{B}^s = \left| \begin{array}{c} (B^1 A^{p_1-n+1}) \dots \\ \dots (B^{M+n-p_1} A^M) B^{M+n-p_1+1} \\ \hline (B^1 A^{p_r-n+1}) \dots \\ \dots (B^{M+n-p_r} A^M) B^{M+n-p_r+1} \end{array} \right|^{(s)},$$

$$s = 1, \dots, N; \quad s = 1, \dots, N+r,$$

с ЛО A^r из (56) [3], B^r — из (75) [3] и

$$N = (M+n)r - \sum_{i=1}^r p_i. \quad (1.14)$$

Итак, НП в системе с симметрической ФР $f_n^{p_1 \dots p_r}$ и n блоками с НП вида (73) [3] имеет смысл потери, имевшейся вначале работоспособности. При этом ресурс нашей системы — N восстановлений — выражается формулой (1.14). Интервалы работоспособности рассматриваемой системы имеют вид $(t_0, \bar{B}^r \bar{A}^1)$; $(\bar{A}^s, \bar{B}^{s+r} \bar{A}^{s+1})$, $s = 1, \dots, N-1$; $(\bar{A}^N, \bar{B}^{N+r})$. Первое изменение НС системы — отказ в момент $\bar{B}^r \bar{A}^1$, окончательный отказ — в момент \bar{B}^{N+r} .

2. Надежность равновесных пороговых систем

Симметрическая ФР (1.1), как и любая ФР, должна быть монотонно неубывающей функцией своих аргументов a_i . Наиболее часто употребляемые в надежности симметрические функции, удовлетворяющие условию монотонности, составляют равновесные пороговые функции.

По определению функция $y = f(a_1, \dots, a_n)$ называется *пороговой*, если

$$y = \begin{cases} 1 & \text{при } \sum_{i=1}^n T_i a_i \geq p; \\ 0 & \text{при } \sum_{i=1}^n T_i a_i < p. \end{cases} \quad (2.1)$$

Здесь T_i — веса аргументов a_i ; p — порог. При $T_1 = \dots = T_n$ пороговая функция называется *равновесной*; ее без ограничения общности запишем как

$$y = \begin{cases} 1 & \text{при } \sum_{i=1}^n a_i \geq p; \\ 0 & \text{при } \sum_{i=1}^n a_i < p. \end{cases} \quad (2.2)$$

Пороговая ФР описывает системы, которые работоспособны, если общее число работоспособных блоков, взятых с учетом их весов T_i в системе, не меньше заданного порога p . В частности, ФР (2.2) описывает параллельную ($p = 1$) и последовательную ($p = n$) системы. Изучим НП в произвольной системе с равновесной пороговой ФР (2.2).

ФР (2.2) есть частный случай симметрической функции $f_n^{p_1 \dots p_r}$ в случае $r = n - p + 1$; $p_1 = p$, $p_2 = p + 1$, ..., $p_r = n$. Поэтому НП в системе с ФР (2.2) и НП в блоках вида (52) [1], выражаются формулами (1.9)—(1.11) при указанных r и p_i , при этом $N = (n - p + 1) \times (M + 1 - 0,5(p + n))$. Аналогично, НП во всей системе с НП в блоках вида (73) [1], выражается формулами (1.12)—(1.14) при тех же r и p_i , причем $N = (n - p + 1)(M + 0,5(n - p))$.

Более обозримые выражения НП в системе с ФР (2.2) можно получить при непосредственном использовании метода, описанного в § 1. Рассмотрим *пороговый элемент* — модель системы. На его выходе реализуется функция (2.2). Воздействия $a_1(t), \dots, a_n(t)$ на его входах — это НП в блоках, реакция $y(t)$ на его выходе — НП в системе. Найдем $y(t)$ по заданным $a_i(t)$. За стандартные (как и в § 1) примем воздействия $a_1(t), \dots, a_n(t)$ вида (52) [3]. Так как пороговая функция (2.2) является симметрической, то воздействия вида (52) [3], мы можем заменить эквивалентной совокупностью свободных импульсов вида (1.3) с параметрами (56) [3]. Пороговый элемент реализует функцию $f_n^{p, p+1, \dots, n}$. Он выдает на выходе единицу в момент времени t , если в этот момент имеется p или $p + 1$ или ... или n единиц на n его входах, т. е. если

в этот момент пересекается не менее p импульсов в эквивалентной воздействию (52) [3], импульсной последовательности (1.3). Так пересекаться может каждая пачка импульсов вида (1.4) с p последовательными импульсами из (1.3). Повторяя рассуждения § 1, находим, что каждая такая пачка при ее изолированном рассмотрении дает вклад (1.5) в искомую реакцию $y(t)$. Учтем теперь взаимодействие пачек между собой. Рассмотрим соседние пачки — k -ю и $(k + 1)$ -ю. Если они не взаимодействуют, то соответствующие им выходные импульсы (1.5) y_k и y_{k+1} не пересекаются и реакция на обе пачки есть пара (y_k, y_{k+1}) . Взаимодействие этих пачек проявляется в пересечении импульсов y_k, y_{k+1} на некотором интервале (a, b) , что означает пересечение на (a, b) всех импульсов обеих пачек, т.е. всех $p + 1$ импульсов объединенной пачки. Значит, в интервале (a, b) на $p + 1$ из n входов элемента действуют единицы и потому на выходе элемента имеем $y = 1$. Таким образом, взаимодействие соседних k -й и $(k + 1)$ -й пачек импульсов вида (1.4) требует объединения соответствующих реакций y_k и y_{k+1} (1.5) в одну $y_{k, k+1}$ согласно выражению

$$y_{k, k+1}(t) = \begin{cases} 1(B^k A^{k+p-1}, B^k) 0(-, -) 1(B^{k+1} A^{k+p}, B^{k+p}), \\ \text{при } B^k \leq B^{k+1} A^{k+p}; \\ = 1(B^k A^{k+p-1}, B^{k+1}) = 1(B^k A^{k+p-1}, B^{k+1} A^{k+p}) \dots \\ \dots 0(-, -) 1(B^{k+1} A^{k+p}, B^{k+1}), \\ \text{при } B^k > B^{k+1} A^{k+p}, \end{cases}$$

или, в терминах НЛ с учетом очевидного неравенства $B^k \leq B^{k+1}$,

$$y_{k, k+1}(t) = 1(B^k A^{k+p-1}, B^k A^{k+p}) \dots \dots 0(-, -) 1(B^{k+1} A^{k+p}, B^{k+1}). \quad (2.3)$$

Взаимодействие несоседних пачек импульсов здесь, как и в § 1, мы не учитываем. Итак, искомая реакция $y(t)$ есть последовательность импульсов (1.5), преобразованных (ср. (1.5) с (2.3)) согласно

$$B_k \rightarrow B^k A^{k+p}, \quad k = 1, \dots, M - p. \quad (2.4)$$

Окончательно реакция порогового элемента-модели на воздействия вида (52) [3] такова:

$$y(t) = 1(B^1 A^p, B^1 A^{p+1}) \dots 1(B^{M-p} A^{M-1}, B^{M-p} A^M) 0(-, -) 1(B^{M-p+1} A^M, B^{M-p+1}), \quad (2.5)$$

где A^r и B^r — ЛО (56) [3]. Таким образом, НП в системе с равновесной пороговой ФР (2.2) и НП вида (52) [3] в блоках есть начальное восстановление работоспособности системы и последующая ее эксплуатация до исчерпания ресурса, равного $M - p + 1$ восстановлений, где $M = \sum_{i=1}^n m_i$ — суммарный ресурс всех блоков; p — порог ФР. Интервалы работоспособности системы $(B^r A^{r+p-1}, B^r A^{r+p})$, $r = 1, \dots, M - p$; $(B^{M-p+1} A^M, B^{M-p+1})$. Первое изменение НС системы — восстановление в момент $B^1 A^p$, первый отказ системы — в момент $B^1 A^{p+1}$, последний (окончательный) — в момент B^{M-p+1} .

Вычислим теперь реакцию порогового элемента-модели на воздействие (73) [3]. Представим (73) [3] в стандартном виде (74) [3]. При этом реакция на воздействия (74) [3] вычисляется по формуле (2.5) при $M \rightarrow M + n$ и ЛО A^r, B^r из (75) [3]. После нужных преобразований (см. [3], § 11, 12) имеем реакцию порогового элемента-модели на воздействия вида (73) [3]:

$$y(t) = 0(B^{n-p+1} A^1, -) 1(B^{n-p+2} A^1, B^{n-p+2} A^2) \dots \dots 1(B^{M+n-p} A^{M-1}, B^{M+n-p} A^M) \dots \dots 0(-, -) 1(B^{M+n-p+1} A^M, B^{M+n-p+1}), \quad (2.6)$$

где A^r — ЛО из (56) [3], B^r — ЛО из (75) [3], т.е. НП в системе с равновесной пороговой ФР (2.2) и НП (73) [3], в блоках имеют смысл потери имевшейся в начале работоспособности. Ресурс системы составляет M восстановлений, интервалы ее работоспособности можно определить по формулам $(B^{n-p+r+1} A^r, B^{n-p+r+1} A^{r+1})$, $r = 1, \dots, M - 1$; $(B^{M+n-p+1} A^M, B^{M+n-p+1})$. Первое изменение НС системы — отказ в момент $B^{n-p+1} A^1$, окончательный отказ системы происходит в момент $B^{M+n-p+1}$.

При $p = 1$ надежность процессы (2.5), (2.6) переходят в соответствующие НП (73) [3], и (76) [3], в параллельных системах, а при $p = n$ — в соответствующие НП в последовательных системах (один из них рассмотрен в (80) [3]).

3. Надежность неравновесных пороговых систем

Изложим методику отыскания НП в системе с ФР в виде общей (неравновесной) пороговой функции (2.1).

1. Веса T_1, \dots, T_n — целые, порог p — произвольный. Для определенности примем $n = 4$, $T_1 = T_2 = T_3 = 1$, $T_4 = 2$, $p = 3$. Тогда ФР (2.1)

$$y = \begin{cases} 1, & a_1 + a_2 + a_3 + 2a_4 \geq 3 \\ 0, & a_1 + a_2 + a_3 + 2a_4 < 3 \end{cases} = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^5 a_i \geq 3 \\ 0, & \sum_{i=1}^5 a_i < 3 \end{cases} \Big|_{a_4=a_5} \quad (3.1)$$

Согласно (3.1) наш 4-входовый пороговый элемент-модель системы эквивалентен по реакции 5-входовому элементу с равновесной пороговой функцией (2.2) и порогом $p = 3$ при $a_4(t) \equiv a_5(t)$. Найдя реакцию последнего на заданные воздействия (§ 2) и учтя дополнительное условие $a_4(t) \equiv a_5(t)$, получим реакцию 4-входового порогового элемента-модели (искомый НП в системе). Изложенная процедура применима при любых n , T_i и p . Ее основа — переход от данного неравновесного порогового элемента к эквивалентному пороговому элементу с равными (единичными) весами, но с большим числом входов.

2. Веса T_1, \dots, T_n — рациональные, порог p — произвольный. Тогда

$$T_i = A_i/B_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.2)$$

где A_i и B_i — целые числа. Пусть число B — наименьшее общее кратное чисел B_1, \dots, B_n . Тогда можно записать

$$T_i = C_i/B, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.3)$$

где $C_i = A_i B / B_i$, $i = 1, \dots, n$, — целые числа. При выполнении умножения всех параметров T_1, \dots, T_n , p порогового элемента на одно и то же число R функция, реализуемая элементом, не меняется. Выберем $R = B$. Тогда, учитывая (3.3), видим, что наш элемент эквивалентен пороговому элементу с весами $T'_i = C_i$, $i = 1, \dots, n$, и порогом $p' = pB$. Так как теперь веса T'_i — целые числа, расчет реакции элемента можно выполнить по методике, рассмотренной в п. 1. Тем самым найдем реакцию на заданные воздействия исходного порогового элемента-модели, т. е. искомый НП в системе.

Пример 1. Система с четырьмя блоками работоспособна, если общее число работоспособных блоков, с учетом их весов в системе, не меньше трех. Веса блоков $T_1 = T_2 = T_3 = 1$, $T_4 = 2$. Блоки в начальный момент исправны, затем отказывают, один раз восстанавливаются

и переходят в состояние окончательного отказа. Найти НП в системе.

Функция работоспособности рассматриваемой системы имеет вид пороговой функции (3.1). Соответствующий пороговый элемент-модель системы эквивалентен 5-входовому элементу с равновесной пороговой функцией (2.2) и порогом $p = 3$. Воздействия на входах 5-входового элемента, моделирующие надежностный процесс в блоках, таковы: $a_1(t) = 0(b_{10}, -)1(a_{11}, b_{11})$; $a_2(t) = 0(b_{20}, -)1(a_{21}, b_{21})$; $a_3(t) = 0(b_{30}, -)1(a_{31}, b_{31})$; $a_4(t) \equiv a_5(t) = 0(b_{40}, -)1(a_{41}, b_{41})$.

Реакция элемента (НП в системе) по формуле (2.6) при $n = 5$, $p = 3$

$$y(t) = 0(B^3 A^1, -)1(B^4 A^1, B^4 A^2) \dots \dots 1(B^7 A^4, B^7 A^5)0(-, -)1(B^8 A^5, B^8). \quad (3.4)$$

Здесь

$$A^r = \begin{vmatrix} a_{11} \\ \dots \\ a_{41} \end{vmatrix}^{(r)}, \quad r = 1, \dots, 5; \quad B^r = \begin{vmatrix} b_{10} b_{11} \\ \dots \\ b_{40} b_{41} \end{vmatrix}^{(r)}, \quad r = 1, \dots, 10.$$

Таким образом, система вначале исправна, в момент $B^3 A^1$ впервые отказывает, в момент $B^4 A^1$ восстанавливается и т. д. и в момент B^8 окончательно отказывает. Заметим, что число различных элементов в ЛО A^r равно 4. Поэтому в семействе ЛО A^1, \dots, A^5 есть два равных ЛО (A^r, A^{r+1}), т. е. в НП системы (3.4) какой-то один интервал работоспособности фактически вырожден. Аналогично в семействе ЛО B^1, \dots, B^{10} есть две пары равных логических определителей (B^p, B^{p+1}) и (B^q, B^{q+1}), так что в НП (3.4) может быть вырождено до двух интервалов работоспособности.

4. Приближенный метод анализа надежности систем

Приближенный метод анализа надежности сложных систем является вариантом аналогичного метода для простых систем, отличающимся тем, что в качестве структурной модели системы используется 4-ступенчатая схема, принятая в методе эквивалентных схем (см. § 9 [3]). Относительная простота этой схемы делает возможным анализ весьма сложных систем. Для реализации приближенного метода нужно иметь оценки моментов начала a_x и окончания b_y реакций $y(t)$ элементов схемы через аналогичные моменты a_x, b_x в их воздействиях $x(t)$ (см. § 3.8 [4]). В 4-ступенчатой схеме имеются че-

тыре типа элементов: задержки, инверторы, n -входовые конъюнкты, n -входовые дизъюнкты (см. § 9 [3]). Для первых двух нужны оценки даются формулами из работы [4], § 3.8. Для n -входовых конъюнкты и дизъюнкты нужны оценки получаются аналогично случаю $n = 2$, который рассмотрен в § 3.8 [4].

5. Практический пример

Найдем НП в сложной системе электроснабжения, состоящей из трех подсистем: 1) генератор Г1 (его НС обозначим a_1), распределительный щит генератора РЩ1 (НС a_3), кабель К1 (НС a_5); 2) генератор Г2 (НС a_2), распределительный щит генератора РЩ2 (НС a_4), кабель К2 (НС a_6); 3) общий распределительный щит РЩ (НС a_7), к которому через РЩ1 и К1 подключен Г1, а через РЩ2 и К2 — Г2; перемычка П (НС a_8), соединяющая РЩ1 с РЩ2. Система работоспособна, если работоспособны все блоки хотя бы одной из подсистем 1 или 2 и блок РЩ, либо если работоспособны все блоки одного из подмножеств (Г1, РЩ1, П, РЩ2, К2, РЩ) или (Г2, РЩ2, П, РЩ1, К1, РЩ). Данная система — автономная однофункциональная логическая. Ее ФР

$$y = a_1 a_3 a_5 a_7 \vee a_1 a_3 a_8 a_4 a_6 a_7 \vee a_2 a_4 a_6 a_7 \vee a_2 a_4 a_8 a_3 a_5 a_7.$$

Пусть любой i -й блок начинает работу в исправном состоянии и имеет ресурс m_i восстановлений, так что НП в блоках имеют вид

$$a_i(t) = 0(b_{i0}, -)1(a_{i1}, b_{i1}) \dots 1(a_{im_i}, b_{im_i}), \quad i = 1, \dots, 8.$$

Для вычисления НП в системе $y(t)$ будем применять метод эквивалентных схем [3]. Сначала по формуле (80) [3], вычисляем процессы на выходах конъюнкты (1-й ступени)

$$y_1(t) = a_1(t) a_3(t) a_5(t) a_7(t) = 0(B_1^1, -)1(B_1^2 A_1^1, B_1^2) \dots 1(B_1^{M_1+1} A_1^{M_1}, B_1^{M_1+1}),$$

где

$$A_1^r = \begin{vmatrix} a_{11} \dots a_{1m_1} \\ a_{31} \dots a_{3m_3} \\ a_{51} \dots a_{5m_5} \\ a_{71} \dots a_{7m_7} \end{vmatrix}^{(r)}, \quad B_1^r = \begin{vmatrix} b_{10} \dots b_{1m_1} \\ b_{30} \dots b_{3m_3} \\ b_{50} \dots b_{5m_5} \\ b_{70} \dots b_{7m_7} \end{vmatrix}^{(r)},$$

$$r = 1, \dots, M_1, \quad M_1 = m_1 + m_3 + m_5 + m_7;$$

$$y_2(t) = a_1(t) a_3(t) a_4(t) a_6(t) a_7(t) a_8(t) = 0(B_2^1, -)1(B_2^2 A_2^1, B_2^2) \dots 1(B_2^{M_2+1} A_2^{M_2}, B_2^{M_2+1}),$$

где

$$A_2^r = \begin{vmatrix} a_{11} \dots a_{1m_1} \\ a_{31} \dots a_{3m_3} \\ a_{41} \dots a_{4m_4} \\ a_{61} \dots a_{6m_6} \\ a_{71} \dots a_{7m_7} \\ a_{81} \dots a_{8m_8} \end{vmatrix}^{(r)}, \quad B_2^r = \begin{vmatrix} b_{10} \dots b_{1m_1} \\ b_{30} \dots b_{3m_3} \\ b_{40} \dots b_{4m_4} \\ b_{60} \dots b_{6m_6} \\ b_{70} \dots b_{7m_7} \\ b_{80} \dots b_{8m_8} \end{vmatrix}^{(r)},$$

$$r = 1, \dots, M_2, \quad M_2 = m_1 + m_3 + m_4 + m_6 + m_7 + m_8;$$

$$y_3(t) = a_2(t) a_4(t) a_6(t) a_7(t) = 0(B_3^1, -)1(B_3^2 A_3^1, B_3^2) \dots 1(B_3^{M_3+1} A_3^{M_3}, B_3^{M_3+1}),$$

где

$$A_3^r = \begin{vmatrix} a_{21} \dots a_{2m_2} \\ a_{41} \dots a_{4m_4} \\ a_{61} \dots a_{6m_6} \\ a_{71} \dots a_{7m_7} \end{vmatrix}^{(r)}, \quad B_3^r = \begin{vmatrix} b_{20} \dots b_{2m_2} \\ b_{40} \dots b_{4m_4} \\ b_{60} \dots b_{6m_6} \\ b_{70} \dots b_{7m_7} \end{vmatrix}^{(r)},$$

$$r = 1, \dots, M_3, \quad M_3 = m_2 + m_4 + m_6 + m_7;$$

$$y_4(t) = a_2(t) a_3(t) a_4(t) a_5(t) a_7(t) a_8(t) = 0(B_4^1, -)1(B_4^2 A_4^1, B_4^2) \dots 1(B_4^{M_4+1} A_4^{M_4}, B_4^{M_4+1}),$$

где

$$A_4^r = \begin{vmatrix} a_{21} \dots a_{2m_2} \\ a_{31} \dots a_{3m_3} \\ a_{41} \dots a_{4m_4} \\ a_{51} \dots a_{5m_5} \\ a_{71} \dots a_{7m_7} \\ a_{81} \dots a_{8m_8} \end{vmatrix}^{(r)}, \quad B_4^r = \begin{vmatrix} b_{20} \dots b_{2m_2} \\ b_{30} \dots b_{3m_3} \\ b_{40} \dots b_{4m_4} \\ b_{50} \dots b_{5m_5} \\ b_{70} \dots b_{7m_7} \\ b_{80} \dots b_{8m_8} \end{vmatrix}^{(r)},$$

$$r = 1, \dots, M_4, \quad M_4 = m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_7 + m_8.$$

После этого по формуле (76) [3], вычисляем процесс на выходе дизъюнкты (второй ступени), т. е. искомый надежностный процесс в системе

$$y(t) = y_1(t) \vee y_2(t) \vee y_3(t) \vee y_4(t) = 0(B^4 A^1, -)1(A^1, B^5 A^2) \dots \dots 1(A^{M-1}, B^{M+3} A^M)0(-, -)1(A^M, B^{M+4}),$$

где

$$A^r = \left| \frac{B_1^2 A_1^1 \dots B_1^{M_1+1} A_1^{M_1}}{B_4^2 A_4^1 \dots B_4^{M_4+1} A_4^{M_4}} \right|^{(r)}, \quad r = 1, \dots, M;$$

$$B^r = \left| \frac{B_1^1 \dots B_1^{M_1+1}}{B_4^1 \dots B_4^{M_4+1}} \right|^{(r)}, \quad r = 1, \dots, M+4, \quad M = \sum_{i=1}^4 M_i.$$

Полученное аналитическое представление $y(t)$ является избыточным и при численном задании НП в блоках часть его участков оказывается вырождена. Пусть, например, наработка между отказами T , время восстановления T_B и ресурс m_i для блоков i системы такие: для генераторов ($i = 1, 2$) $T = 10\ 000$ ч, $T_B = 100$ ч, $m_1 = m_2 = 2$; для щитов ($i = 3, 4, 7$) $T = 20\ 000$ ч, $T_B = 20$ ч, $m_3 = m_4 = m_7 = 3$; для кабелей ($i = 5, 6$) $T = 30\ 000$ ч, $T_B = 50$ ч, $m_5 = m_6 = 2$; для переключки ($i = 8$) $T = 40\ 000$ ч, $T_B = 10$ ч, $m_8 = 3$. Тогда НП в блоках конкретизируются

$$\begin{aligned} a_1(t) &= a_2(t) = 0(10000, -) \dots \\ &\dots 1(10100, 20100)0(-, -)1(20200, 30200); \\ a_3(t) &= a_4(t) = a_7(t) = 0(20000, -)1(20020, 40020) \dots \\ &\dots 0(-, -)1(40040, 60040)0(-, -)1(60060, 80060), \\ a_5(t) &= a_6(t) = 0(30000, -)1(30050, 60050) \dots \\ &\dots 0(-, -)1(60100, 90100); \\ a_8(t) &= 0(40000, -)1(40010, 80010) \dots \\ &\dots 0(-, -)1(80020, 120020)0(-, -)1(120030, 160030), \\ M_1 &= 10, M_2 = 16, M_3 = 10, M_4 = 16. \end{aligned}$$

По приведенным выше формулам подсчитываем нужные ЛО: сначала $A_1^r, \dots, A_4^r, B_1^r, \dots, B_4^r$, затем A^r и B^r , наконец, конъюнкции $B^{k+3}A^k$. Подставляя все в выражение НП в системе $y(t)$, после исключения вырожденных участков найдем

$$\begin{aligned} y(t) &= \\ &= 0(10000, -)1(10100, 20000)0(-, -)1(20020, 30100) \dots \\ &\dots 0(-, -)1(20200, 30000)0(-, -)1(30050, 30200). \end{aligned}$$

Итак, система вначале исправна, в момент $t_1 = 10\ 000$ впервые отказывает, в момент $t_2 = 10\ 100$ восстанавливается, в момент $t_3 = 20\ 000$ снова отказывает и т. д., наконец в момент $t_5 = 30\ 100$ окончательно отказывает.

Заключение

Содержательно использованная в данной работе надежностная модель сложной системы в виде логической зависимости надежностного состояния системы от надежностных состояний ее блоков аналогична рассмотренной ранее модели надежности простых систем. Поэтому она также структурно воплощается в виде некоторого динамического автомата, входные процессы которого моделируют надежностные процессы в блоках системы, а выходной процесс — надежностный про-

цесс в самой системе. Так что вычисление надежностных процессов в системах сводится к хорошо разработанным в теории автоматов методам вычисления выходных процессов динамических автоматов по их входным процессам. При этом использование математического аппарата логических определителей позволяет преодолеть "проклятие размерности" системы, что дает возможность выполнять вычисления в системах большой сложности. В настоящей работе, являющейся продолжением работы [1], с помощью аппарата логических определителей решены задачи построения аналитических формул для вычисления характеристик надежности нескольких классов сложных систем.

Работа в целом продолжает цикл исследований автора, посвященных разработке математического аппарата логической теории надежности. От опубликованных ранее работ автора [2, 3] данная работа существенно отличается использованием аппарата логических определителей.

Список литературы

1. Левин В. И. Непрерывная логика и анализ надежности сложных систем. Математический аппарат // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 4. С. 195—204.
2. Левин В. И. Логические методы в теории надежности сложных систем. I // Вестник Тамбовского университета. 2011. Т. 16, № 5. С. 1415—1422.
3. Левин В. И. Логические методы в теории надежности сложных систем. II // Вестник Тамбовского университета. 2011. Т. 16, № 6. С. 1487—1497.
4. Левин В. И. Логическая теория надежности сложных систем. М.: Энергоатомиздат, 1985. 129 с.
5. Безопасность и надежность технических систем. М.: Университетская книга, Логос, 2008. 376 с.
6. Викторова В. С., Степанянц А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: Ленанд, 2014. 256 с.
7. Хан Дж. Дж., Догановский Н., Мир Уи. К. Анализ надежности с учетом видов отказов // Методы менеджмента качества. 2013. № 6.
8. Бусленко Н. П. Математическое моделирование производственных процессов на ЦВМ. М.: Наука, 2010.
9. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 2010. 524 с.
10. Капур К., Ламберсен Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 2010. 504 с.
11. Максимов Я. А. Технология моделирования надежности информационных систем // В мире научных открытий. 2009. № 1.
12. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
13. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2007.
14. Острейковский В. А. Теория надежности. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2008.
15. O'Connor P., Kleynner A. Practical Reliability Engineering. N.-Y.: Wiley, 2012.

Continuous Logic and Analysis of Reliability of Complex Systems. Investigation of Some Classes of Systems

In recent years the increasing attention of scientists and designers of technical systems has been acquiring the issues of improving methods for assessing the reliability and safety of these systems, in connection with tasks of increasing the values of these characteristics. The purpose of the article is to develop an automata-logical model of reliability of complex technical systems and corresponding logical methods for evaluating the reliability of such systems, which, unlike known ones, use not the traditional probabilistic reliability indicators, but deterministic logical indicators. In order to achieve this goal, the article suggests using the observed moments of successive failures and recovery of the elements of the technical system as initial data, and as the reliability characteristics of the system itself the moments of successive failures and recovery of this system. In this case, the problem of estimating the reliability of a system is reduced to constructing its mathematical model in the form of automata logical functions expressing the moments of its successive failures and reconstructions through analogous moments of all its elements. This article is the second part of the work in which an automata-logical model designed to calculate the logical function of reliability of complex technical systems is developed in detail. The novelty of the work is the construction of an adequate logical model of the reliability of a complex system, which makes it possible to reduce the estimation of reliability of a complex technical system to the calculation of its logical reliability functions. In the process of calculation, the mathematical apparatus of logical determinants is used for the first time, which allows us to solve the complexity problem. In the article the logical model of reliability and methods of its investigation are developed in detail, allowing to introduce new indicators of reliability of complex technical systems that do not require for their evaluation the use of probabilistic methods and initial statistical data on element failures. On the basis of the developed logical model of reliability and methods of its investigation, the problem of constructing an automata system for reliability of systems is solved, which will allow to fulfill practical calculations of complex technical systems by methods of the theory of dynamic automata using the apparatus of logical determinants

Keywords: complex system, switching process, reliability process, dynamical automaton, binary operator, structure of operator, logical theory of reliability

DOI: 10.17587/it.25.340-348

References

1. Levin V. I. *Informazionnye Tekhnologii*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 195–204 (in Russian).
2. Levin V. I. *Vestnik Tambovskogo Universiteta*, 2011, vol. 16, no. 5, pp. 1415–1422 (in Russian).
3. Levin V. I. *Vestnik Tambovskogo Universiteta*, 2011, vol. 16, no. 6, pp. 1487–1497 (in Russian).
4. Levin V. I. Logical theory of reliability of complex systems, Moscow, Energoatomizdat, 1985, 129 p. (in Russian).
5. Safety and reliability of technical systems, Moscow, Universi-tetskaâ kniga, Logos, 2008, 376 p. (in Russian).
6. Viktorova V. S., Stepanyanc A. S. Models and methods for calculating the reliability of technical systems, Moscow, Lenand, 2014, 256 p. (in Russian).
7. Han Dz. Dz., Doganovskij N., Mir Ui. K. *Metody Menedzhmenta Kachestva*, 2013, no. 6 (in Russian).
8. Buslenko N. P. Mathematical modeling of production processes on digital computers, Moscow, Nauka, 2010 (in Russian).
9. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. Mathematical methods in the theory of reliability, Moscow, Nauka, 2010, 524 p. (in Russian).
10. Kapur K., Lamberson L. Reliability and system design, Moscow, Mir, 2010, 504 p. (in Russian).
11. Maksimov Ya. A. *V Mire Naučnyh Otkrytij*, 2009, no. 1 (in Russian).
12. Polovko A. M., Gurov S. V. Fundamentals of the theory of reliability, SPb., BHV-Peterburg, 2006, 702 p. (in Russian).
13. Ryabinin I. A. Reliability and safety of structurally complex systems, SPb., Publishing house of Sankt-Peterburgskii un-t, 2007 (in Russian).
14. Ostrejkovskij V. A. Theory of Reliability, Moscow, Vysshaya shkola, 2008 (in Russian).
15. O'Connor P., Kleyner A. Practical Reliability Engineering, N.-Y., Wiley, 2012.

В. Н. Гридин¹, науч. руководитель, д-р техн. наук, проф., e-mail: info@ditc.ras.ru,

В. И. Анисимов^{1,2}, гл. науч. сотр., д-р техн. наук, проф., e-mail: info@ditc.ras.ru,

М. М. Абухазим², аспирант, e-mail: Abuhazim_monther@Yahoo.com,

¹ Центр информационных технологий в проектировании РАН,

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Индексно-численная технология сжатия данных в системах автоматизации схмотехнического проектирования*

Рассматриваются способы увеличения производительности систем автоматизированного проектирования на основе перехода к компактной форме хранения и обработки разреженных матриц. Дается описание наиболее эффективного метода компактного хранения и обработки разреженных матриц на основе строчно-столбцового фиксированного формата. Показывается, что отличительной особенностью методов фиксированного формата является невозможность включения в описание дополнительных ненулевых элементов, что исключает возможность непосредственного применения этих методов для обработки информации при решении систем уравнений любым численным методом, вследствие неизбежного появления новых ненулевых элементов в процессе этого решения. Для возможности учета новых ненулевых элементов в компактном описании моделируемой системы предлагается использовать индексно-численную технологию формирования такого описания и дается описание реализации сжатия данных на основе разделения общей процедуры на две независимые части индексного и численного анализа. Приводится методика построения программного обеспечения систем автоматизации схмотехнического проектирования на основе индексно-численной технологии сжатия данных.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, моделирование систем, компактная обработка, разреженные матрицы, строчно-столбцовый фиксированный формат

Введение

Наличие в математическом описании моделируемых систем разреженных матриц требует изменения стандартных подходов к формированию и решению систем уравнений, что вызвано, с одной стороны, необходимостью экономии памяти, которую нежелательно использовать для хранения нулевых элементов, а с другой стороны, необходимостью повышения быстродействия за счет исключения арифметических операций с нулевыми элементами. Эта задача особенно актуальна при построении систем с распределенной архитектурой, когда информационные ресурсы предоставляются потребителям посредством сетевых сервисов [1–4]. Применяемый обычно способ логической проверки элементов в целях устра-

нения арифметических операций с нулевыми элементами не приводит к ожидаемому эффекту увеличения быстродействия программного обеспечения, поскольку для выполнения логических операций проверки элементов также необходимо затратить определенное время.

Известные методы компактной обработки разреженных матриц существенно отличаются по своим характеристикам и своей эффективностью [5–9], при этом наиболее высокими показателями степени экономии памяти характеризуется метод строчно-столбцового фиксированного формата. Однако этот метод вследствие фиксированности формата не позволяет вводить в ходе обработки дополнительные элементы в описание. Вместе с тем новые ненулевые элементы неизбежно появляются в процессе решения уравнений моделируемой схемы. Поскольку формат описания в фиксированном формате жестко задан, то в нем не зарезервированы места для размещения новых

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-07-00082а.

ненулевых элементов, что ограничивает возможности метода в классической форме только решением задач хранения в сжатой форме неизменной информации.

В настоящей статье рассматривается индексно-численная технология сжатия данных, основанная на использовании двухэтапной процедуры построения компактного описания, включающей в себя индексный и численный этапы. При этом на индексном этапе уточняется формат описания схемы с учетом возможного появления новых ненулевых элементов в процессе решения уравнений схемы, а на численном этапе в уточненном формате формируется компактное описание моделируемой схемы без предварительного построения ее полных разреженных матриц. На заключительном этапе выполняется решение уравнений моделируемой схемы, при этом расчет переменных осуществляется виртуальными алгоритмами на основе компактных численных массивов без отображения в памяти компьютера полной разреженной матрицы.

Индексно-численная технология сжатия данных на основе строчно-столбцового фиксированного формата

Метод строчно-столбцового формата [5, 6] является наиболее эффективным методом сжатия данных и основан на использовании фиксированного формата, при этом предполагается, что исходная матрица W является структурно-симметричной, такой что каждому ненулевому элементу w_{ij} можно поставить в соответствие элемент w_{ji} . В случае если такой элемент в исходной матрице отсутствует, то его необходимо создать искусственно путем включения в компактное описание элемента $w_{ji} = 0$.

Для компактного хранения исходных элементов матрицы, требуется создать три массива:

WD — для хранения диагональных элементов;

WL — для хранения ненулевых элементов, расположенных ниже диагонали (поддиагональных элементов);

WU — для хранения ненулевых элементов, расположенных выше диагонали (наддиагональных элементов).

В соответствии с методом при формировании массива WU наддиагональные элементы записываются по строкам, а при формировании массива WL поддиагональные элементы записываются по столбцам. Согласно принятому порядку формирования массивов WU , WL

относительный адрес некоторого элемента w_{ij} , расположенного в массиве WU , совпадает с относительным адресом элемента w_{ji} , расположенного в массиве WL . Отмеченное свойство существенно упрощает процесс программирования для организации сканирования элемента.

Для хранения индексов строк и столбцов ненулевых элементов в методе строчно-столбцового фиксированного формата используется массив WJI , при этом этот массив содержит номера столбцов ненулевых элементов, расположенных выше диагонали, которые совпадают с номерами строк транспонированных ненулевых элементов, расположенных ниже диагонали. Для определения точки входа в строку выше диагонали (точка входа в столбце ниже диагонали) используется массив ERC . В последний элемент этого массива заносится значение $(m - n)/2 + 1$.

Степень эффективности метода может быть определена коэффициентом эффективности использования памяти $\beta = M/M_1$, где M — объем памяти, требуемый для полного описания разреженной матрицы, M_1 — объем памяти, требуемый для компактного описания разреженной матрицы.

Если учесть, что длина массива WD составляет n элементов, длина массивов WU , WL , WJI составляет $(m-n)/2$ элементов, а длина массива ERC составляет n элементов, то эффективность метода строчно-столбцового фиксированного формата может быть определена выражением

$$\beta = \frac{8n^2}{n^2\alpha \cdot 9 + n}$$

Отсюда следует, что эффективность метода приближается к максимально-возможному значению $1/\alpha$ и дальнейшее снижение объема памяти при компактном описании уже практически невозможно.

Поскольку формат всех массивов жестко зафиксирован и не должен меняться произвольным образом в процессе расчета, отличительной особенностью метода является невозможность включения в массивы дополнительных ненулевых элементов. Это обстоятельство исключает возможность непосредственного применения метода строчно-столбцового фиксированного формата для решения уравнений любым численным методом вследствие неизбежного появления новых элементов с ненулевыми значениями при решении уравнений. Поэтому в классической форме метод строчно-

столбцового фиксированного формата может быть практически использован только для хранения разреженных матриц в сжатой форме.

Следовательно, для возможности полноценного использования метода строчно-столбцового формата на всех шагах расчета необходима его модификация путем введения двухэтапной процедуры построения компактного описания, включающей в себя индексный этап и численный этап [10]. На первом, индексном этапе определяются только размеры всех массивов с учетом появления новых элементов с ненулевыми значениями. Поскольку на этом этапе не ставится задача формирования и обработки численной информации, то его выполнение осуществляется путем обработки некоторой целочисленной матрицы C , элементы которой имеют только два произвольных значения, например 0 и 1. Для формирования численных массивов служит второй этап, где используются определенные на первом этапе форматы массивов, учитывающие зарезервированные места для всех вновь созданных ненулевых элементов массивов. Процесс индексно-численной технологии сжатия данных может быть реализован согласно блок-схеме, приведенной на рис. 1.

Согласно блок-схеме на этапе индексного анализа (шаги 1–3) формируется индексная матрица C , имеющая такие же размеры, как исходная матрица. На следующем шаге индексного этапа проводится LU -факторизация индексной матрицы, целью которой является уточнение формата компактного описания. В процессе индексной LU -факторизации выполняется упорядочивание строк и столбцов индексной матрицы в целях обеспечения минимального числа вновь появившихся ненулевых элементов. На заключительном третьем шаге индексного этапа осуществляется построение координатных матриц ERC , WJI , SI , в которых будет содержаться информация о структуре матрицы C , и, следовательно, матрицу C можно удалить.

На численном этапе (шаги 4–10) на основании уже известного формата описания открываются массивы, где будут формироваться численные матрицы WU , WL , WD , и выполняется формирование соответствующих массивов. Здесь же приводится численная LU -факторизация, при этом LU -факторизация выполняется виртуально путем обработки компактных массивов WU , WL , WD , так как полная разреженная матрица не существует, и необходима разработка специального алгоритма LU -факторизации, отличающегося от известных алгоритмов общего вида.

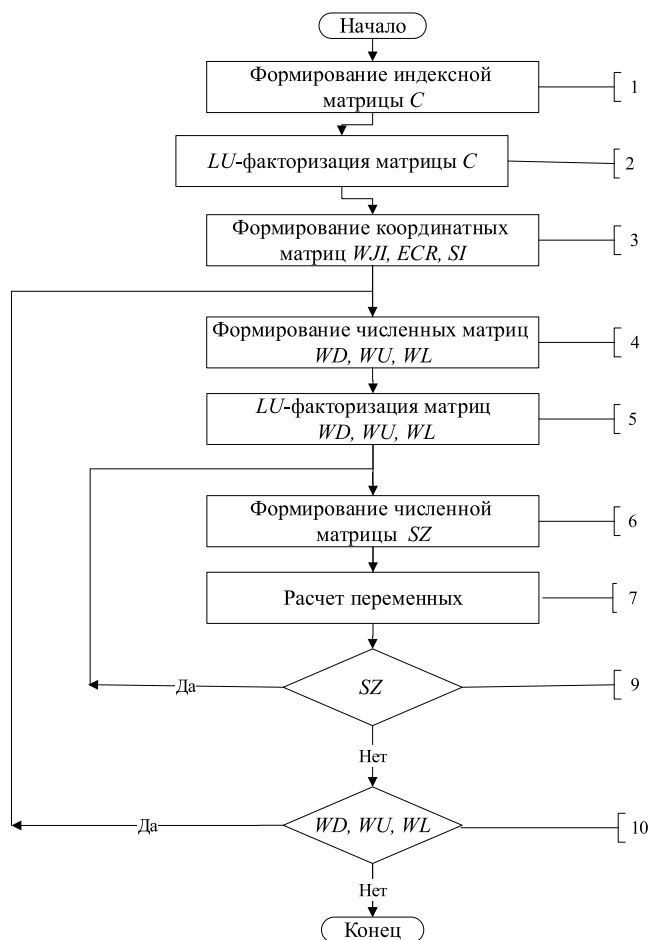


Рис. 1. Блок-схема индексно-численной технологии сжатия данных

После завершения численного этапа выполнения LU -факторизации на шаге 6 осуществляется формирование массива задающих источников SZ , и на шаге 7 выполняется расчет всех переменных системы и перекодировка этих переменных согласно проведенному на этапе индексного анализа упорядочиванию столбцов и строк. Такая задача согласно общей методике LU -факторизации решается с помощью обратного и прямого хода по строкам исходной матрицы. Так как исходная матрица отсутствует, то прямой и обратный ход следует выполнять на основании компактного описания, что также требует создания специальных алгоритмов.

На шаге 9 осуществляется проверка необходимости изменения содержимого массива SZ задающих источников и, если необходимо, выполняется возврат к шагу 6. На шаге 10 осуществляется проверка необходимости изменения содержимого массивов численных параметров схемы, содержащихся в компактных массивах WU , WL , WD , и, если необходимо, выполняется возврат к шагу 4.

Существенным достоинством рассмотренной индексно-численной процедуры является разделение ее на две независимые части, содержащие индексный и численный этапы. Так как практически все реальные задачи разработки электронных схем связаны с многовариантным расчетом схемы выбранной структуры, то индексный этап выполняется для каждой структуры единственный раз, тогда как численный этап реализуется десятки, сотни а иногда и тысячи раз.

Однако индексно-численная процедура характеризуется довольно сложной логикой разработки программного обеспечения, и при построении системы моделирования на основе компактного описания целесообразно использовать созданное ранее полное математическое описание задачи в качестве прототипа для построения ее компактного описания.

Модификация программного обеспечения на этапе индексного анализа

Под модификацией программного обеспечения будем понимать переработку существующего программного обеспечения, основанного на полном математическом описании задачи, в целях перехода к новому описанию моделируемой схемы и решению сформированных уравнений на основе компактного описания задачи согласно блок-схеме, представленной на рис. 1. Наличие прототипа значительно упрощает процесс создания программного обеспечения, основанного на сжатии данных, однако для наиболее эффективного использования имеющегося материала необходимо иметь в распоряжении методику разработки модифицированных версий программного обеспечения.

На первом шаге этапа индексного анализа выполняется формирование индексной матрицы, для которой необходимо создать соответствующий массив размерности $(n + 1)(n + 2)$, где n — общее число переменных для текущей задачи с учетом расширения базиса. Основная информация о включении компонентов схемы хранится в строках и столбцах, индексы которых находятся в интервале от 1 до n , в нулевом столбце массива хранится информация о месторасположении задающих источников, а в нулевой строке содержится вектор P , в котором хранится информация о всех перестановках строк и столбцов матрицы схемы. Столбец с индексом $n + 2$ также является вспомогательным и в нем хранится информация о числе

наддиагональных ненулевых элементов, которая используется при работе алгоритма минимальной степени (алгоритма Марковица) при выборе оптимальной последовательности строк (столбцов), обеспечивающей минимизацию числа новых значащих элементов при выполнении LU -преобразования.

Для формирования индексной матрицы при решении задачи модификации программного обеспечения на основе имеющегося прототипа следует использовать имеющиеся в этом прототипе функции формирования описания компонентов схемы `form_str` и построить на их основе новую совокупность функций `sform_str`, единственное отличие которых от прототипа `form_str` заключается в замене оператора формирования каждого ненулевого элемента массива $w[i][j]$, отображающего разреженную матрицу схемы, оператором формирования соответствующего элемента индексной матрицы $C_{ij} = 1$. Для завершения формирования массива C следует заполнить его нулевую строку и $(n + 2)$ -й столбец, где хранится информация о числе наддиагональных ненулевых элементов, для чего удобно создать вспомогательную функцию.

Для выполнения индексного этапа LU -факторизации необходимо построить вспомогательную функцию, осуществляющую замену процедуры реальной LU -факторизации ее эквивалентом на основе "портрета" схемы, отображенной в индексной матрице. Обработка "портрета" схемы должна выполняться одновременно с проведением оптимального упорядочивания нумерации строк (столбцов) матрицы C . Для такого упорядочивания наиболее эффективным является алгоритм минимальной степени [11], который реализуется исходя из выбора минимального значения произведения $r_k c_k$, где r_k — число ненулевых элементов в k -й строке на k -м шаге, а c_k — число ненулевых элементов в k -м столбце. Применительно к структурно-симметричной матрице выполняется соотношение $r_k = c_k$, и алгоритм минимальной степени приводит к требованию минимизации числа элементов в k -й строке. При этом для сохранения структурной симметрии в процессе оптимального упорядочивания необходимо осуществлять перестановку как строк, так и столбцов. Поскольку перестановка столбцов приводит к перестановке вектора переменных, то информацию о выполненных перестановках необходимо обязательно сохранять до конца расчета, для чего используется нулевая строка массива C .

Помимо решения задачи оптимального упорядочивания строк и столбцов на основе критерия минимизации появления новых значащих элементов при выборе ведущего элемента на этапе индексного анализа процесса LU -факторизации следует также обеспечить ненулевое значение этого элемента в полном описании матрицы W . Очевидно, что только такое условие позволит выполнить пересчет элементов на численном этапе LU -факторизации. Вместе с тем при описании систем в расширенном базисе узловых потенциалов [12, 13] не равные нулю значения диагональных коэффициентов матрицы обеспечиваются только для значений n , не превышающих величины nv , где nv — число узлов схемы. При $n > nv$ диагональные элементы могут иметь нулевые значения, и, следовательно, выбор их в качестве ведущих недопустим. Чтобы устранить указанное препятствие, следует соответствующим образом организовать работу оптимального упорядочивания строк и столбцов в процессе индексной LU -факторизации. С этой целью в начале упорядочивания следует провести перестановки строк (столбцов), индексы которых не превышают значение nv , а затем осуществить процедуру упорядочивания строк и столбцов, изменяя индексы в пределах от $nv + 1$ до n . Если следовать указанному алгоритму оптимального упорядочивания, то в процессе пересчета элементов при $n \leq nv$ все диагональные элементы для $n > nv$ приобретут ненулевые значения, и работа на численном этапе окажется возможной.

Таким образом, процедура LU -факторизации на этапе индексного анализа должна выполняться в следующей последовательности.

1. Ввести вспомогательный вектор N , начальные значения элементов которого определяются числом ненулевых недиагональных элементов в i -й строке матрицы C , а также вектор перестановок P , начальные значения элементов которого определяются натуральным рядом целых чисел.

2. Среди значений N_i ($i = \overline{1, nv}$) выбрать элемент N_i с минимальным значением и осуществить перестановку i -й и l -й строк и i -го и l -го столбцов, а также i -го и l -го элементов векторов N и P .

3. Выполнить первый шаг LU -факторизации матрицы C . Если $C_{i1} \neq 0$ и $C_{li} \neq 0$, а $C_{ij} = 0$, то в матрицу C следует ввести элемент $C_{ij} = 1$.

4. Провести модификацию вектора N путем прибавления к элементу N_i единицы с проявлением каждого нового ненулевого элемента и

вычитания единицы из каждого элемента N_j ($j = \overline{2, n}$), для которого $C_{j1} \neq 0$. При этом модифицированный вектор N будет характеризовать насыщенность строк подматрицы $[C]_2^n$ ненулевыми недиагональными элементами.

5. Выполнять шаги 2—4, пока $k \leq nv$, после чего искать $N_i = N_{i_{\min}}$ среди строк с индексами $i = nv, n$.

После проведения индексной LU -факторизации необходимо провести подсчет числа ненулевых наддиагональных элементов ni в индексной матрице на основании информации, содержащейся в $(n + 2)$ -м столбце массива C , а также подсчет числа значащих элементов ns в его нулевом столбце, для чего удобно построить вспомогательную функцию (например, us). Определенное в результате работы этой функции значение ni определяет формат массива наддиагональных элементов WU и массива поддиагональных элементов WL , а значения ns — формат массива SI .

Для формирования координатного описания целесообразно построить вспомогательную функцию (например, $cord$), целью которой является построение массивов WJI , ERC , SI , отображающих соответствующие матрицы, формат которых уже определен на предыдущих шагах индексного этапа. Координатные массивы WJI , ERC , SI , а также массив перестановок P должны быть открыты после окончания работы функции us , реализующей расчет форматов массивов. Компактный массив WJI содержит индексы столбцов исходной полной матрицы в ее наддиагональной части и вследствие структурной симметрии исходной матрицы одновременно содержит также и индексы столбцов ненулевых элементов в ее поддиагональной части. Связанный с индексом j -го столбца относительный адрес aw может быть найден путем последовательного сканирования строк индексной матрицы C с подсчетом текущего суммарного значения числа aw элементов $C_{ij} = 1$, расположенных выше диагонали, что позволяет определить элемент $WJI[aw] = j$. Формирование координатной матрицы ERC , содержащей относительные адреса входа в строку, осуществляется в одном цикле с формированием WJI путем нахождения относительного адреса aw , при этом сканирование i -й строки определяет значение $ERC[i] = aw + 1$.

Одновременно с этими массивами функция $cord$ должна формировать массив SI , содержание которого отображает структуру нулевого столбца исходной матрицы. Относительный адрес элемента этого массива as подсчитыва-

ется путем вычисления числа значащих элементов в этом столбце. Функция `cord` также заполняет массив P содержанием нулевой строки индексной матрицы C . Это необходимо делать потому, что после формирования координатного описания матрица C удаляется из памяти либо на очередном витке уборки мусора, либо в явной форме путем вызова соответствующей системной функции.

Модификация программного обеспечения на этапе численного анализа

Перед началом формирования численного описания компонентов моделируемой схемы следует открыть массивы WD , WU , WL для хранения компактного описания, при этом все указанные массивы должны быть обнулены до их использования. Каждый тип компонента моделируемой электронной схемы требует разработки своего уникального алгоритма, однако все эти алгоритмы могут быть построены в соответствии с единообразной методикой, которая рассматривается далее.

Исходными данными для формирования описания компонентов типа `str` являются массивы включения компонентов `in_str` и значений параметров `z_str`, кроме того, известно содержание массивов WJI и ERC . Конечной целью является описание компонентов в компактных массивах WD , WU , WL , для чего необходимо решить две вспомогательные задачи.

Во-первых, необходимо определить новые значения ii индексов строк и столбцов jj , которые получаются после многократных перестановок этих строк и столбцов в процессе их оптимального упорядочивания. Такая задача решается путем организации цикла, в котором реализуется перекодировка индексов всех переменных согласно содержанию вектора перестановок P .

Второй задачей, которая возникает на этапе численного формирования, является определение относительного адреса, т. е. местоположения элемента в массивах WL , WU , куда необходимо занести значение параметра w_{ij} описываемого компонента. Так, если требуется найти относительный адрес для некоторого элемента w_{ij} , для которого значения индексов строк и столбцов изменены с i на ii и с j на значение jj , то такая задача может быть решена путем включения программного обеспечения цикла, по выходе из которого значение относительного адреса a будет соответствовать эле-

менту, расположенному в (ii) -й строке и (jj) -м столбце. Вследствие структурной симметрии, этот же относительный адрес определяет положение элемента в ii -м столбце и jj -й строке ниже диагонали.

В соответствии с изложенной стратегией нетрудно построить совокупность функций формирования описания компонентов для всех компонентов `str` схемы. Структура таких функций в целом будет повторять структуру, аналогичную соответствующим функциям формирования полной матрицы и отличается от последних только наличием приведенных выше фрагментов для выполнения перекодировки и нахождения относительных адресов.

При решении уравнений моделируемой схемы на численном этапе компактной обработки в качестве основы для численной LU -факторизации можно принять блок-схему (рис. 2), которая позволяет наиболее просто осуществить расчет элементов матриц L и U по виду массива полной матрицы W схемы. В результате реализации приведенной блок-схемы в массиве w отображается как элемент матрицы L , так и элементы матрицы U , при этом в поддиагональной части и на диагонали будут содержаться элементы матрицы L , а в наддиагональной части — элементы матрицы $U-E$ (где E — единичная матрица).

Однако, поскольку массив w при компактной обработке отсутствует, то необходимо разработать алгоритм поиска элементов w_{kk} , w_{ki} , w_{kj} , w_{ij} непосредственно в массивах WD , WU , WL .

Элемент w_{kk} легко выделяется из компактного массива WD по известному значению переменной k , т. е. $w_{kk} = WD[k]$.

Элементы w_{kj} и w_{ik} находятся сканированием массива WJI в границах $a_{k1} = ERC[k]$,

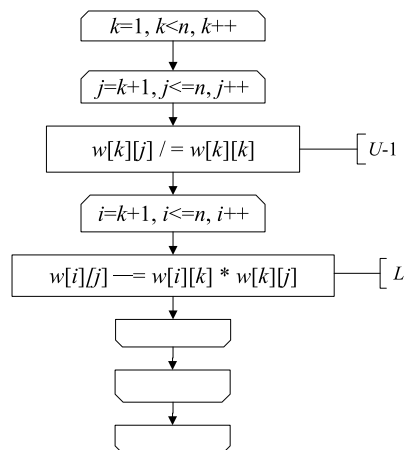


Рис. 2. Блок-схема численной LU -факторизации

$a_{k2} = ERC[k + 1] - 1$, что позволяет найти относительные адреса a_i и a_j расположения индексов i и j .

Таким образом, имеем соотношения для поиска элемента w_{kj} :

$$j = WJI[a_j], w_{ij} = WU[a_j],$$

и аналогичные соотношения для поиска элемента w_{ik} :

$$i = WJI[a_i], w_{ik} = WL[a_i].$$

В отличие от элементов w_{kj} и w_{ik} , расположение которых относительно диагонали заранее известно, элемент w_{ij} может находиться в любом месте j -го столбца. При этом возможны три случая

1) $i = j$, при этом элемент следует искать в массиве WD , т.е. $w_{ii} = WD[i]$;

2) $i < j$, при этом поиск надо осуществлять в i -й строке j -го столбца, начиная с относительного адреса $a_i = ERC[i]$, и искомым относительный адрес находится в пределах границ a_{i1} и a_{i2} , элемент извлекается из массива WU ;

3) $i > j$, поиск необходимо осуществлять в j -м столбце и i -й строке. Так как ниже диагонали элементы расположены по столбцам, то относительный адрес входа в столбец определяется выражением $a_j = ERC[j]$. Поскольку искомым относительный адрес находится в пределах границ a_{i1} и a_{i2} , то зная значение относительного адреса, можно извлечь искомым элемент из WL .

Таким образом, численная LU -факторизация может быть осуществлена на основе компактных численных массивов WD , WU , WL и координатных массивов ERC , WJI без отображения в памяти компьютера полной разреженной матрицы.

В результате LU -факторизации исходное матричное уравнение электронной схемы

$$WX + S = 0$$

распадается на два уравнения

$$\begin{aligned} UX &= Q, \\ LQ + S &= 0, \end{aligned}$$

где X — вектор переменных исходного уравнения; S — вектор задающих источников; U — верхняя треугольная матрица; L — нижняя треугольная матрица; Q — вспомогательный вектор переменных.

При расчете переменных сначала выполняется прямой ход, в процессе которого решается второе уравнение относительно вспомогательного вектора Q , затем решается первое уравнение, что дает искомые значения вектора X .

В процессе прямого хода выполняется последовательный расчет переменных, образующих вспомогательный вектор Q :

$$q_1 = s_1/l_{11}, q_i = -\left(s_i + \sum_{j=1}^{i-1} l_{ij}q_j\right)/l_{ii}, i = \overline{(2, n)}.$$

Приведенная форма реализации прямого хода является общепринятой при полном описании моделируемых систем разреженными матрицами, однако она является крайне неудобной при использовании ее в случае компактного описания на основе строчно-столбцового фиксированного формата. Это объясняется тем, что приведенные соотношения требуют выполнения сканирования матрицы L по строкам. Вместе с тем в строчно-фиксированном формате элементы, расположенные ниже диагонали, формируются в компактных матрицах по столбцам, и, следовательно, сканирование компактной матрицы WL , отображающей в компактной форме нижнюю треугольную матрицу L , оказывается невозможным. Следовательно, возникает задача разработки нового алгоритма реализации прямого хода, который будет осуществлять сканирование не по строкам, а по столбцам.

Для модификации алгоритма прямого хода запишем уравнение прямого хода $LQ + S = 0$ в виде

$$DQ + (L - D)Q + S = 0, \quad (1)$$

где D — диагональная матрица, образованная из диагональных элементов матрицы L .

Введем вспомогательный вектор T , определяемый выражением

$$T = (L - D)Q.$$

Тогда уравнение (1) может быть записано в виде

$$DQ + T + S = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) имеет вид

$$Q = D^{-1}(T + S). \quad (3)$$

Составляющие вектора T можно формировать путем накопления элементов по мере вы-

числения очередных значений. При этом i -я составляющая t_i вектора получает приращение $\Delta t_i = l_{ij}q_j$ ($i = \overline{j+1, n}$).

Естественно, перед началом указанной процедуры начальные значения вектора T должны быть обнулены. Используя обновленное на очередном шаге значение вектора T , можно последовательно рассчитывать значения составляющих вектора Q , используя скалярное представление уравнения (3):

$$q_j = -(t_j + s_j)/l_{jj}, \quad (j = \overline{1, n}).$$

При этом для $j = 1$ имеем $t_j = 0$ и $q_1 = -s_1/l_{11}$.

Далее, найдем $t_2 = l_{21}q_1$, что позволяет вычислить следующую составляющую вектора вспомогательных переменных:

$$q_2 = -(t_2 + s_2)/l_{22}.$$

Аналогичным образом вычисляются все остальные составляющие вектора вспомогательных переменных Q , который используется в качестве задающего вектора при выполнении обратного хода.

Естественно, что изложенный алгоритм в силу своей относительной сложности нецелесообразно рекомендовать при полном описании схемы разреженными матрицами. Однако этот алгоритм выполнения прямого хода LU -факторизации, в отличие от общеизвестного алгоритма, реализует сканирование исходной матрицы по столбцам. Именно такая организация сканирования является единственно возможным способом поиска элементов поддиагональной части исходной матрицы при ее компактном представлении в строчно-столбцовом фиксированном формате.

На обратном ходе осуществляется решение уравнения $UX = Q$, при этом для организации вычислительного процесса необходимо осуществлять сканирование по строкам. Поскольку в строчно-столбцовом фиксированном формате наддиагональные элементы записываются по строкам, то нет необходимости при переходе к компактной обработке менять общепринятую стратегию построения алгоритма реализации обратного хода. Необходимо лишь организовать сканирование i -й строки в границах $a_1 = ERC[i]$, $a_2 = ERC[i+1] - 1$.

Поскольку в процессе LU -факторизации на этапе индексного анализа выполнялось оптимальное упорядочивание строк и столбцов в соответствии с алгоритмом минимальной

степени, фактическая нумерация последовательности строк и столбцов отличается от исходной. Следовательно, при окончательном расчете переменных моделируемой системы необходимо осуществить перекодировку вектора X согласно содержанию вектора перестановок P .

Заключение

Рассмотренная в статье индексно-численная технология сжатия данных основана на использовании двухэтапной процедуры построения компактного описания, включающей в себя индексный и численный этапы. При этом на индексном этапе уточняется формат описания схемы с учетом возможного появления новых ненулевых элементов в процессе решения уравнений схемы, а на численном этапе в уточненном формате формируется компактное описание моделируемой схемы без предварительного построения ее полных разреженных матриц. На заключительном этапе выполняется решение уравнений методом LU -факторизации, при этом расчет переменных осуществляется на основе компактных численных массивов WD , WU , WL и координатных массивов ERC , WJI без отображения в памяти компьютера полной разреженной матрицы.

Практическая реализация двухэтапного процесса сжатия данных позволяет существенно повысить эффективность работы систем автоматизированного проектирования.

Список литературы

1. Анисимов В. И., Гридин В. Н. Методы построения систем автоматизированного проектирования на основе Интернет-технологий и компактной обработки разреженных матриц // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 1. С. 3–7.
2. Коваленко О. С., Курейчик В. М. Обзор проблем и состояний облачных вычислений и сервисов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7. С. 146–153.
3. Гридин В. Н., Дмитриевич Г. Д., Анисимов Д. А. Построение систем автоматизированного проектирования на основе web-технологий // Информационные технологии. 2011. № 5. С. 23–27.
4. Анисимов Д. А. Методы построения систем автоматизации схмотехнического проектирования на основе веб-сервисов // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2012. № 10. С. 56–61.
5. Писсанецки С. Технология разреженных матриц. М.: Мир, 1988. 406 с.
6. Эстербю О., Златев З. Прямые методы для разреженных матриц. М.: Мир, 1987.
7. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Т. 1. М.: Мир, 1976, 734 с.

8. **Баталов Б. В., Егоров Ю. Б., Русаков С. Г.** Основы математического моделирования больших интегральных схем на ЭВМ Основы математического моделирования больших интегральных схем на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1982. 168 с.

9. **Джордж А., Лю Д.** Численное решение больших разреженных систем уравнений. М.: Мир, 1984. 333 с.

10. **Гридин В. Н., Анисимов В. И., Абухазим М. М.** Сжатие данных в системах автоматизации схмотехнического

проектирования на основе методов фиксированного формата // Системы высокой доступности. 2016. № 4. С. 34–40.

11. **Влах И., Сингхал К.** Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. М.: Радио и связь, 1988. 560 с.

12. **Чуа Л. О., Лин Пен-Мин.** Машинный анализ электронных схем. М.: Энергия, 1980. 631 с.

13. **Норенков И. П.** Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высшая школа, 1986.

V. N. Gridin¹, Scientific Director, D. Sc., Professor, e-mail: info@ditc.ras.ru,
V. I. Anisimov^{1,2}, Chief Researcher, D. Sc., Professor, e-mail: vianisimov@inbox.ru,
M. M. Abuhazim², Postgraduate student, e-mail: Abuhazim_monther@Yahoo.com,

¹ Design information technologies Center Russian Academy of Sciences, Odintsovo, Russian Federation,

² Saint-Petersburg Electrotechnical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Index-Numerical Technology of Data Compression in Automation Systems of Circuit Design

The ways to increase the productivity of computer-aided design based on the transition to a compact form of storage and processing of sparse matrices. The description of the most effective method of compact storage and processing of sparse matrices on the basis of a fixed row-column format is given. It is shown that a distinctive feature of the fixed format methods is the impossibility of including additional non-zero elements in the description, which excludes the possibility of direct application of these methods for information processing in solving systems of equations by any numerical method, due to the inevitable appearance of new non-zero elements in the process of this solution. To be able to take into account new non-zero elements in the compact description of the simulated system, it is proposed to use the index-numerical technology for the formation of such a description and a description of the implementation of data compression based on the division of the General procedure into two independent parts of the index and numerical analysis. The technique of construction of the software of systems of automation of circuit design on the basis of index-numerical technology of data compression is given.

Keyword: computer-aided design systems, system modeling, compact processing, sparse matrices, row-column fixed format

DOI: 10.17587/it.25.349-357

Reference

1. **Anisimov V. I., Gridin V. N.** *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i Proizvodstve*, 2009, no. 1, pp. 3–7 (in Russian).

2. **Kovalenko O. S., Kurejchik V. M.** *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie Nauki*, 2012, no. 7, pp. 146–153 (in Russian).

3. **Gridin V. N., Dmitrevich G. D., Anisimov D. A.** *Informacionnye Tekhnologii*, 2011, no. 5, pp. 23–27 (in Russian).

4. **Anisimov D. A.** *Izvestiya SPbGEHTU "LEHTI"*, 2012, no. 10, pp. 56–61 (in Russian).

5. **Pissanecki C.** *Sparse Matrix Technology*, Moscow, Mir, 1988, 406 p. (in Russian).

6. **Ehsterbyu O., Zlatev Z.** *Direct methods for sparse matrices*, Moscow, Mir, 1987 (in Russian).

7. **Knut D.** *The art of computer programming*, vol. 1, Moscow, Mir, 1976. 734 p. (in Russian).

8. **Batalov B. V., Egorov Yu. B., Rusakov S. G.** *Fundamentals of mathematical modeling of large integrated circuits on a computer*, Moscow, Radio i svyaz', 1982, 168 p. (in Russian).

9. **Dzhordzh A., Lyu D.** *Numerical solution of large sparse systems of equations*, Moscow, Mir, 1984, 333 p. (in Russian).

10. **Gridin V. N., Anisimov V. I., Abuhazim M. M.** *Sistemy vysokoj dostupnosti*, 2016, no. 4, pp. 34–40 (in Russian).

11. **Vlah I., Singhal K.** *Machine methods of analysis and design of electronic circuits*, Moscow, Radio i svyaz', 1988, 560 p. (in Russian).

12. **Chua L. O., Lin Pen-Min.** *Machine analysis of electronic circuits*, Moscow, ENnergiya, 1980, 631 p. (in Russian).

13. **Norenkov I. P.** *Introduction to computer-aided design of technical devices and systems*, Moscow, Vysshaya shkola, 1986 (in Russian).

А. Б. Барский, д-р техн. наук, проф., e-mail: arkbarsk@mail.ru,
Д. И. Мельник, канд. техн. наук, ст. науч. сотр, e-mail: mdi_dim@mail.ru,
В. В. Пирожник, канд. техн. наук, ст. науч. сотр, e-mail: vovanina56@mail.ru,
НИИЦ (г. Москва) ЦНИИ ВВКО Минобороны России

Модель управления качеством вычислительных средств распределенной многоканальной системы массового обслуживания

Приводятся показатели качества вычислительных средств, управляющих распределенной многоканальной системой массового обслуживания. Для предлагаемых проектов таких средств или проектов их модернизации в результате испытаний или экспертным путем находятся ожидаемые характеристики качества. По ним определяется рейтинг таких проектов на основе ассоциативного сравнения с известными, предполагаемыми или условными проектами разного рейтинга. Принимается решение о том, отвергается ли проект низкого рейтинга или возможна его доработка. Система принятия решений строится на логической нейронной сети.

Ключевые слова: пиковая производительность, реальная производительность, структурная надежность, функциональная надежность, безопасные вычисления, нейросетевая рейтинговая система

Введение

Глобальные компьютерные сети, телекоммуникационные системы связи, энергетические и транспортные системы, системы государственного и социального управления, а также территориально-распределенные системы обороны образуют жизненно важный класс сложных систем [1–3] — многоканальные системы массового обслуживания. К производительности и надежности вычислительных средств, управляющих этими системами, предъявляются весьма жесткие требования [4, 5]. Особую актуальность обрели требования безопасных вычислений, обусловленных применением сетевых технологий. Развивающиеся типы кибератак, среди которых особую опасность представляют целевые кибератаки, приводят не только к хищению и искажению информации, но и к выводу из строя всей системы управления. Результаты кибератак чаще всего не поддаются своевременному раскрытию. Отсюда следует, что необходимый мониторинг системы управления проводится в условиях разнообразия *нечетких данных* о ее функционировании. Выводы о состоянии вычислительных средств для их восстановления и проведения мероприятий по повышению их надежности, а также для их модернизации становятся недостаточно достоверными.

Даже такие, казалось бы, измеряемые характеристики, как реальная производительность, вероятность обнаружения и исправления ошибок и другие характеристики, также следует отнести к нечетким данным, так как они зависят от решаемых задач, от условий решения, от состояния среды и пр.

Для выводов по нечетким данным применяются средства искусственного интеллекта, которые позволяют использовать экспертные оценки там, где точные расчеты невозможны. Поэтому применение нейросетевых рейтинговых систем [6, 7] для комплексной оценки состояния и качества функционирования управляющих вычислительных средств, представляется важным и актуальным.

1. Показатели качества управляющих вычислительных средств

1. Оценки результатов испытаний и опытной эксплуатации:

- пиковая производительность;
- реальная производительность при решении функциональных задач;
- обеспечение и наличие двух уровней распараллеливания (возможность комплексирования многопроцессорных систем и наличие

многих исполнительных устройств в составе арифметико-логического устройства (АЛУ));

- наличие высокоэффективных средств автоматизации программирования с языков высокого уровня (ЯВУ) или средств построения оптимальных управляющих программ на ассемблере;
- структурная (аппаратная) надежность (с учетом комплексирования характеризуется коэффициентом готовности K_r);
- функциональная надежность (вероятность решения задачи или успешного функционирования в течение заданного времени);
- эффективность аппаратного контроля, средств диагностики и самовосстановления вычислительного процесса.

II. *Оценки комплексирования многопроцессорных вычислительных средств на общей оперативной памяти:*

- архитектура "общее решающее поле";
- архитектура *data flow* (динамическое распределение работ проводится без вмешательства операционной системы (ОС));
- наличие команды *if-then-else*, уменьшающее число условных переходов;
- достаточный объем оперативной памяти (ОП), допускающий закрепление памяти за пользователем без применения средств динамического распределения памяти;
- ОС поддерживает режим многоканального обслуживания запросов в реальном времени;
- высокий коэффициент загрузки процессоров вычислительных систем (ВС) при решении функциональных или контрольных задач;
- предельные характеристики комплексирования, при которых время решения задач еще убывает с ростом накладных расходов на синхронизацию и разрешение конфликтов при обращении к общим ресурсам.

III. *Оценка комплексирования вычислительных комплексов (ВК), в том числе на базе сетевых технологий:*

- реальная производительность вычислительных комплексов при распределенном решении функциональных или контрольных задач;
- предельные характеристики комплектации, при которых убывает время решения функциональных задач при возрастании накладных расходов на организацию взаимодействия модулей;
- наличие общего адресного пространства распределенной оперативной памяти, обеспеченного "быстрыми" связями "процессор — процессор", матричным коммутато-

ром или магистралями с плавающим приоритетом доступа;

- наличие локальной оперативной памяти (ЛОП) у каждого процессора.

IV. *Оценки сетевого взаимодействия средств системы:*

- пропускная способность сети при обмене пакетами данных;
- среднее время выполнения запроса на обмен данными;
- вероятность выполнения запроса на обмен.

V. *Экспертные, не измеряемые оценки:*

- состояние процесса проектирования и перспективы разработки:

а) разработка налажена и ведется;

- б) разработка налажена в близкой перспективе;

в) разработка не налажена, перспектива не определена;

- модульность, возможность комплектации по предъявляемым требованиям к производительности и надежности;
- качество реализации двухуровневого управления в ВС и ВК;
- наличие и эффективность типового контроля;
- соответствие требованиям стандартизации и унификации;
- степень применения зарубежных технологий;
- стоимость разработки, включая НИР;
- стоимость эксплуатации;
- эффективность применяемых и разрабатываемых средств обеспечения безопасных вычислений;
- наличие и эффективность средств адаптивной маршрутизации для повышения пропускной способности сети, снижения среднего времени обмена данными и повышения вероятности выполнения запроса;
- оценка качества применяемого протокола обмена;
- наличие и эффективность средств параллелизации вычислений средствами глобальной сети Интернет;
- оценка трудно проверяемых качеств или качеств, связанных с чрезвычайно дорогими методами проверки: механических, температурных, химического и радиационного воздействия и др.

2. Оценка производительности управляющих вычислительных средств

На этапе разработки технического задания (ТЗ) на систему и ее вычислительные сред-

ства формулируется многокритериальная задача: *создать систему максимальной производительности при максимальной надежности и при минимальной стоимости* (критерий "производительность — надежность — стоимость"). Именно так практически выстраиваются три критерия по сложности их удовлетворения.

Производительность P_{BC} [8] однородной многопроцессорной системы при решении контрольной задачи (КЗ) находится следующим образом:

$$P_{BC} = n \times k_3 \times P_0,$$

где n — число процессоров производительности P_0 ; k_3 — коэффициент загрузки процессора при решении контрольной задачи.

Для мультимикропроцессорной системы легко посчитать производительность (число операций в секунду) микропроцессора RISC-архитектуры, даже с учетом развитой системы команд. Однако достижение критерия $k_3 \rightarrow \max$ зависит от

- а) архитектурных решений;
- б) практически весьма невысоких возможностей распараллеливания алгоритма решаемой задачи, за исключением редко встречающихся векторных операции.

Эти два момента и ставят вопрос о многопроцессорной системе, решающей одновременно много задач, и об объединении всех арифметико-логических устройств (АЛУ) процессоров в общее решающее поле [9].

3. Требования к управляющим многопроцессорным вычислительным системам

1. Управляющая многопроцессорная ВС должна набираться из стандартных однокристалльных вычислительных модулей, исключая периферийное оборудование, в соответствии с функциональными требованиями и требованиями стандартизации и унификации.

2. Модуль представляет собой микропроцессор RISC-архитектуры (микропроцессор с ограниченным числом базовых команд). Его функциональное назначение реализуется с помощью микропрограмм.

3. Архитектурная сложность базового однокристалльного микропроцессора — число логических элементов на кристалле, плотность размещения и связи — должна соответствовать возможностям отечественных технологий и удовлетворять требованиям противостояния механическому, температурному, химическому,

световому, радиоволновому и радиационным воздействиям.

4. Средства внутреннего взаимодействия модулей ВС или ВК могут быть встроены в базовый кристалл или реализоваться на типовом кристалле внешних связей.

5. Для оперативной параллельной связи с глобальной сетью Интернет могут применяться *web*-объекты — компьютеры связи [10], обладающие своими адресами и участвующие в параллельном приеме данных из глобальной сети. Они могут быть функционально выполнены на базовом кристалле.

6. Формируемые вычислительные установки должны соответствовать требованиям проведения регламентных работ управления надежностью: избыточной комплектацией и высокой ремонтпригодностью.

7. Программы ВС должны быть инвариантны относительно длины массивов данных и структуры системы.

8. Реальная производительность ВС должна достигаться не только за счет высокой пиковой производительности микропроцессоров, но также за счет высокого коэффициента полезной загрузки всех модулей при решении конкретных функциональных или контрольных задач.

9. Внедрение сетевых технологий в технологии управления распределенными многоканальными системами требует учета качества оперативного взаимодействия средств системы при решении функциональных задач. Испытательными средствами должны быть модели обслуживания, воспроизводящие технологии управления. Контрольная задача развивается до уровня контрольной модели (КМ).

10. Для оптимизации загрузки модулей ВС должна быть реализована концепция "многопроцессорная ВС на общем решающем поле". Эта концепция разработана в ИПУ РАН (В. В. Игнатушенко, системы ПС-3000, ПС-3100) в соответствии с концепцией разработки "хороших" машин на "плохой" элементно-конструкторской базе.

11. Накладные расходы на управление параллельной работой большого числа модулей ВС должны быть минимальными, с использованием принципа *data flow* и без использования средств операционной системы (ОС). Вмешательство ОС явилось предметом критики при внедрении "Эльбрус-1" и "Эльбрус-2". (Например, по опыту разработки систем реального времени А. Е. Тимофеев [13] решил вопрос о том, как на этапе программирования пользоваться стековым механизмом процедур, а из рабочей программы его

исключить, превратив программу в линейную и тем самым ускорив ее выполнение без многочисленных обращений к ОС.)

12. Подчеркнем, что в основе управляемого вычислительного процесса лежит концепция *многоканальной системы массового обслуживания*, обоснованная Н. П. Бусленко. При выборе конфигурации системы на процессорах с помощью ОС формируется требуемое или максимально допустимое число каналов обслуживания. Суммарное число каналов, образуемых всеми процессорами, является параметром системы при обслуживании потока заявок. По разным каналам асинхронно должны выполняться программы (возможно, одинаковые) обработки информации или управления объектами. Внутри системного такта управления каналы на одном процессоре обрабатываются в едином цикле. Переключение каналов проводится по специальной команде изменения контекста на основе базирования. Это исключает необходимость трудоемкого прерывания и дополнительного тактирования при переключении с канала на канал (с объекта на объект). Такое переключение каналов служит рациональному совместному использованию ресурсов производительности каждого процессора всеми работающими каналами при неравномерной рабочей нагрузке и организации скользящего резервирования, примененного в МВК "Эльбрус-1" и "Эльбрус-2".

13. Для способа распараллеливания "по информации" при решении сложных задач, а также для возможной синхронной обработки обслуживаемых объектов на основе общих, возможно, модифицируемых данных должен быть реализован режим *SPMD — Single Program — Multiple Data (одна программа — много потоков данных)*. Специфические команды для этого режима разрабатываются [8] на основе микропрограммирования.

4. Управляющие вычислительные средства виртуального информационного пространства

Привлекательна идея управления сложной системой, в которой вычислительные средства расположены в виртуальном информационном пространстве. Преимущества в обеспечении неувязимости таких систем очевидны. В то же время ясно, что на данном уровне состояния в области сетевых технологий предстоит сделать очень многое для повышения оперативности обработки данных и скорости обмена ими.

При организации распределенных виртуальных вычислений обнаруживаются операции взаимодействия узлов сети, которые ставят под сомнение целесообразность применения такого способа вычислений для конкретных задач или технологий их решения. При реализации *SPMD*-технологии решения задач возникает проблема заключительной сборки результатов вычислений на головном компьютере. Распараллеливание обмена вида "много узлов → узел" требует серьезных разработок параллельных каналов приема данных. Особую актуальность задача обеспечения параллельного приема данных обретает при организации взаимодействия виртуальных компьютеров с помощью сети Интернет.

Для многоканального приема данных в работе [10] предлагается использовать в качестве единого внешнего устройства несколько самостоятельных *web*-объектов, осуществляющих параллельный прием данных. На каждом таком *web*-объекте должен быть реализован конвейер обработки пакетов, содержащий не менее трех уровней обработки. Конечно, должны быть разработаны специальные протоколы обмена данными в компьютерной сети.

С развитием сетевых компьютерных технологий увеличилась *опасность внешнего враждебного воздействия* на систему управления и информационные системы: проведение разрушительных системных операций, взлом баз данных, вывод из строя оборудования и др. Виртуализация управления позволяет, с одной стороны, обеспечивать вычислительный ресурс и скрывать средства управления системы от внешних угроз, но, с другой стороны, делает эти средства привлекательными, доступными и уязвимыми для кибератак.

Опыт разработки ранних моделей МВК "Эльбрус" доказал значительный вес типового контроля при решении проблемы защиты от внешних сетевых атак. Использование дескрипторов массивов и сегментов программ в этих условиях становится мощным средством против внедрения вирусов, червей и прочих все более изощренных средств нарушения правильных вычислений и сохранности информации.

Типовой контроль можно осуществлять с помощью тегов, с помощью закрепления мест хранения данных разных типов с различным статусом защиты, а также с помощью разделения цепей обработки разных типов данных. Все методы характеризуются своей эффективностью, определяемой экспериментально.

По мнению Б. Бабаяна [11], идеолога последней версии микропроцессора "Эльбрус" [12], основную опасность представляет возможность внешнего конструирования указателей. Для запуска вируса, червя и пр. должен быть сформирован и внедрен указатель на него. В МК "Эльбрус-1" и "Эльбрус-2" указатель — тип данных, защищенный тегом. Выполнение операций над ним, так же как его формирование извне, невозможны. В микропроцессоре "Эльбрус" во всем объеме теговая архитектура не реализована.

5. Нейросетевая модель управления качеством при развитии парка управляющих вычислительных средств

В основе модели лежит "рейтинговый" подход к управлению качеством сложной системы [7]. Для характеристики рейтинга модернизируемой или разрабатываемой вычислительной системы используется система показателей качества, представленная выше. Точки факторного пространства определяются значениями реальных или целевых показателей качества,

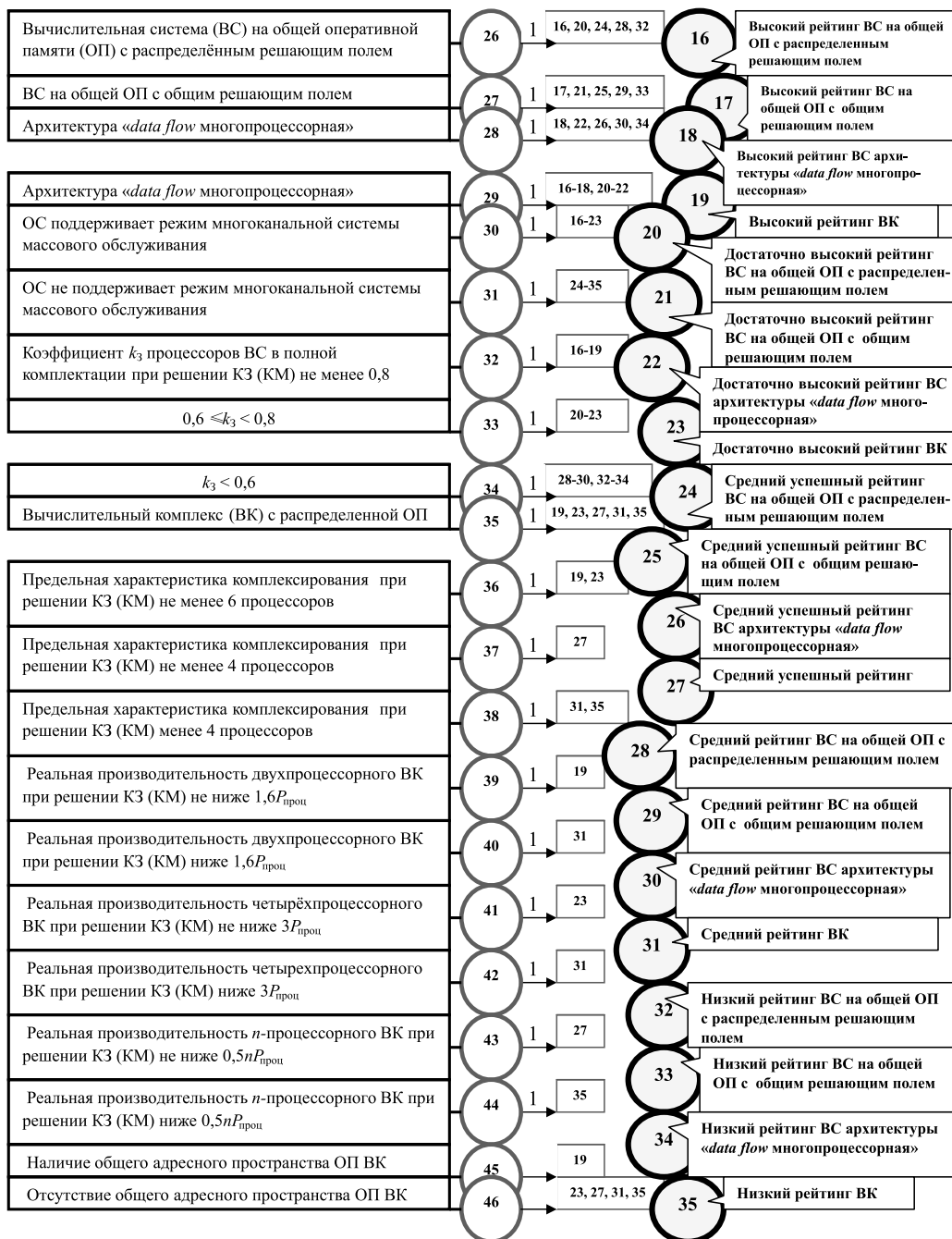


Рис. 2. Фрагмент логической нейронной сети для оценки качества комплексирования ВС и ВК

часть которых поддаются численным расчетам, а часть определяются экспертами. На основе опытных или расчетных данных выбираются характеристики ряда известных, предполагаемых или условных проектов, рассматриваемых в качестве опорных эталонов различного рейтинга. Рейтинг этих проектов находится экспертным путем. Должен учитываться и критерий соответствия ТЗ на разработку. Так создается исходная база знаний (БЗ) для рассматриваемой модели.

Рейтинг вычислительных средств может быть:

- *высокий*;
- *достаточно высокий*, учитывающий технологически возможные доработки;
- *средний успешный*, предполагающий дальнейшее развитие научно-технических исследований;
- *средний*, свидетельствующий о неправильном или технологически недоступном пути выбора решения, но заслуживающем внимание за неимением другого выбора;
- *низкий*, при котором разработка должна быть отвергнута.

Полученная БЗ интерпретируется с помощью однослойной логической нейронной сети (рис. 1, см. вторую сторону обложки, рис. 2—4). В этой нейронной сети следует построить связи (обучить ее) не для всех возможных ситуаций. Только "интересные" или практически предлагаемые ситуации следует исследовать по данной системе рейтинга, опасаясь противоречий. Задание на входе этой системы других и даже большинства ситуаций приведет к тому, что возбуждение ни одного нейрона не превысит порог. Это будет свидетельствовать о рейтинге "ниже низкого".

В связи со значительным объемом построенную логическую нейронную сеть можно разбить на четыре части, обусловленные тремя этапами работы с ней. На первом

этапе на базе возбуждения, в основном рецепторов 1—24, необходимо оценить качество процессора (микروпроцессора), являющегося основой всей вычислительной установки (рис. 1, см. вторую сторону обложки). На втором этапе (см. рис. 2) необходимо оценить возможности комплексирования ВС и ВК на базе этого процессора (рецепторы 25—41). На третьем этапе (см. рис. 3) необходимо оценить применение сетевых технологий (рецепторы 42—54). Экспертные оценки (рецепторы 55—85) корректируют решения, принимаемые на всех этапах (рис. 4).

Большое число показателей качества делает актуальным введение весов связей, определяемых в результате экспертных оценок и анализа применения сети. На рисунках даются началь-

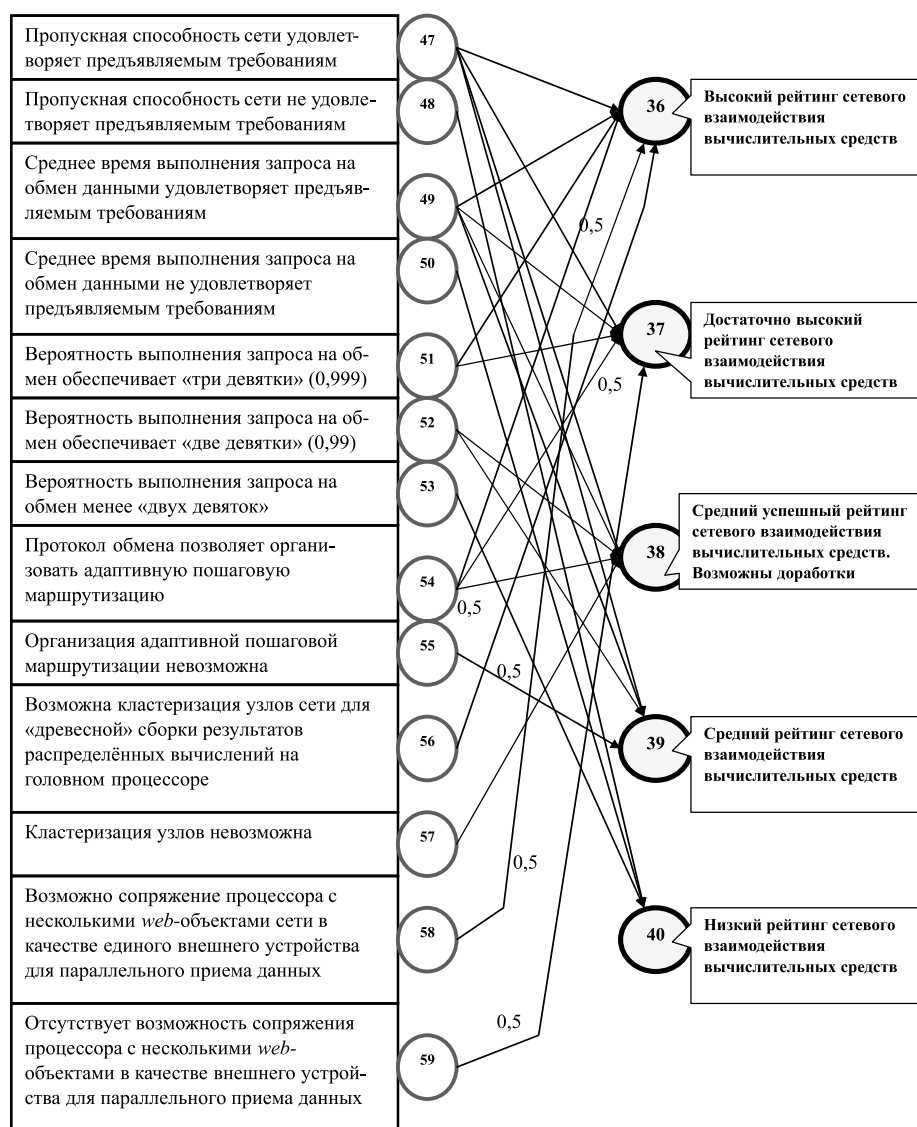


Рис. 3. Фрагмент логической нейронной сети для оценки качества сетевого взаимодействия вычислительных средств

ные, примерные предложения, являющиеся далеко не окончательными.

Вывод по базе знаний проводится с помощью функции активации нейронов, проводящей "голосование" в пользу рейтинга наиболее близкого действительного, предполагаемого или условного проекта [6]. Следует отметить простоту внесения изменений и уточнений в данную логическую нейронную сеть в процессе ее эксплуатации.

Функция активации нейронов имеет общий вид, интерпретируемый значением среднего сигнала, приходящего на данный нейрон:

$$V_i = \begin{cases} \frac{\sum_{\{j\}} \omega_j v_j}{\sum_{\{j\}} \omega_j}, & \text{если это значение не менее порога } h; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

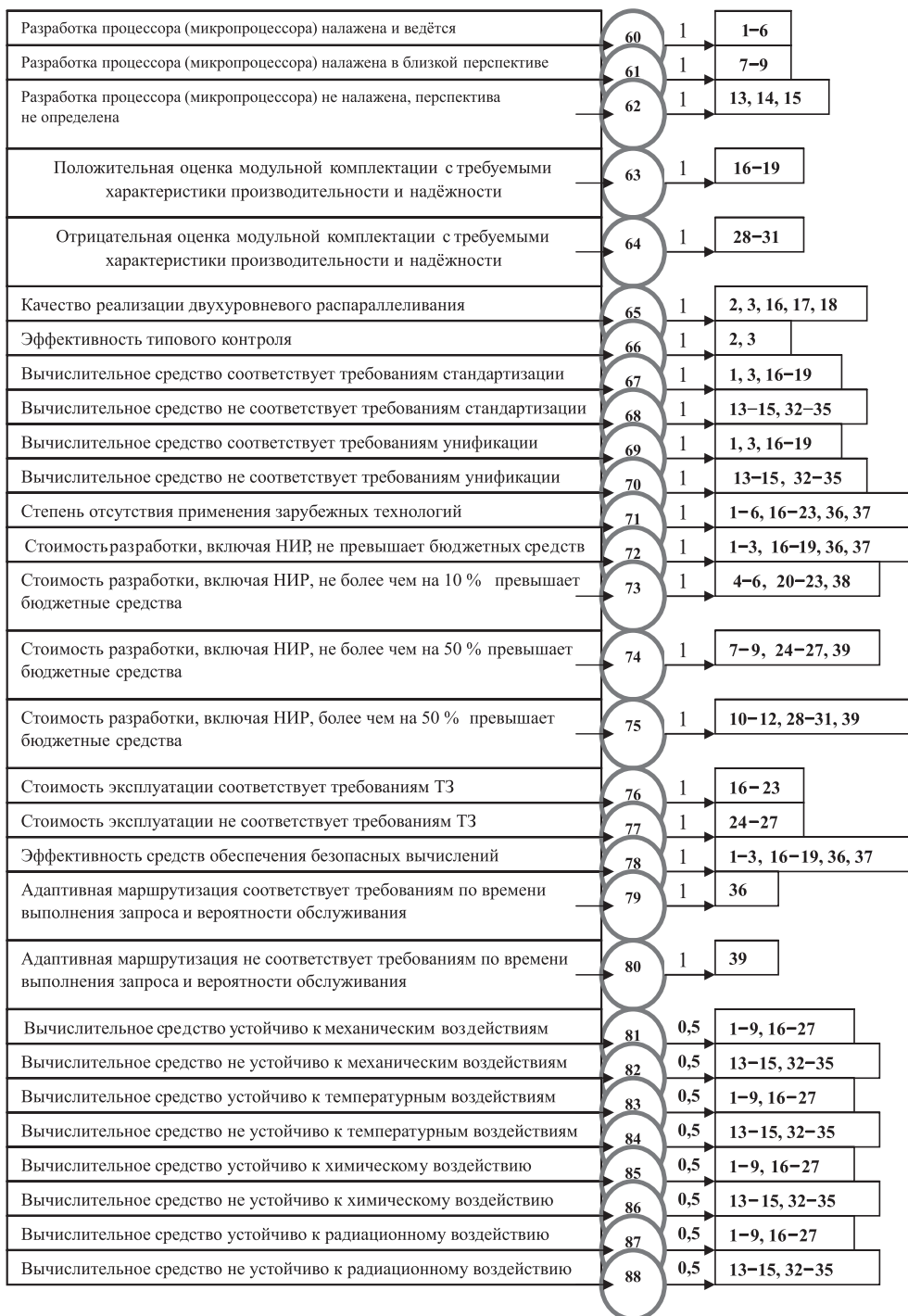


Рис. 4. Фрагмент логической нейронной сети для экспертных и трудно проверяемых оценок качества вычислительных средств

Здесь V_i — возбуждение i -го нейрона; $\{j\}$ — множество связей i -го нейрона с рецепторами; ω_j — вес j -й связи нейрона; v_j — возбуждение j -го рецептора. Порог h выбирается экспериментально, из соображений строгости оценок при снижении трудоемкости их получения и уточняется, как и веса, в процессе эксплуатации нейросети. Положим первоначально $h = 0,8$.

Так как нейроны обладают неодинаковым числом связей с рецепторами, то для каждого нейрона его функция активации может отличаться числом учитываемых весов.

Системы принятия решений предполагают простейшую обработку легко модифицируемых матриц связей [6]. Вид такой матрицы для построенной логической нейронной сети представлен фрагментами в таблице.

Фрагменты матрицы связей логической нейронной сети

Нейроны, указывающие на решения с их номерами	Рецепторы и места задаваемых значений										
	1	2	3	4	5	...	84	85	86	87	88
Нейрон 1 (Решение 1)	1			1		...		0,5		0,5	
Нейрон 2 (Решение 2)	1			1		...		0,5		0,5	
Нейрон 3 (Решение 3)	1			1		...		0,5		0,5	
Нейрон 4 (Решение 4)	1			1		...		0,5		0,5	
Нейрон 5 (Решение 5)	1			1		...		0,5		0,5	
Нейрон 6 (Решение 6)	1			1		...		0,5		0,5	
Нейрон 7 (Решение 7)		1			1	...		0,5		0,5	
Нейрон 8 (Решение 8)		1			1	...		0,5		0,5	
.....						...					
Нейрон 35 (Решение 35)						...			0,5		0,5
Нейрон 36 (Решение 36)						...					
Нейрон 37 (Решение 37)						...					
Нейрон 38 (Решение 38)						...					
Нейрон 39 (Решение 39)						...					
Нейрон 40 (Решение 40)						...					

6. Как работать с данной системой оценки качества

Напомним, что задаваемое пользователем значение возбуждения каждого рецептора равно достоверности закрепленного за ним высказывания о принадлежности данных. Все тексты, сопровождающие изображения рецепторов на рис. 1—4, могли бы заканчиваться знаком "?". Сообщение рецепторам значений этой достоверности является основной задачей пользователя, определяющего рейтинг испытываемого проекта.

Между показателями качества существует некоторая корреляция, которую следует учитывать при возбуждении рецепторов. Так, высокая эффективность типового контроля, реализованного в теговой архитектуре МВК "Эльбрус-1" и "Эльбрус-2", является весьма важным средством обеспечения безопасных вычислений. Это следует учитывать при возбуждении рецепторов 66 и 78. Необходимо развить вопрос, задаваемый на рецепторе 78. Ведь оценка эффективности средств противодействия угрозам при обеспечении безопасных вычислений проводится по отношению к заданным компонентам, например, такого вектора: {вероятность обнаружения угроз нулевого дня равна 0,99; вероятность восстановления вычислительного процесса в цикле управления равна 0,99; ограничение времени восстановления после обнаружения кибератаки; достоверность результатов вычислений после восстановления и др.}.

Методика возбуждения рецепторов [6] весьма проста. Если испытываемое значение некоторого фактора представлено рецептором, то возбуждение этого рецептора полагается равным единице. Если испытываемое значение некоторого фактора не представлено каким-либо рецептором, то "единица" делится обратно пропорционально "расстоянию" этого значения до двух ближайших представленных значений, определяя возбуждение соответствующих рецепторов. Например, пусть в результате испытаний выяснилось, что реальная производительность лишь на 4 % не удовлетворяет требованиям ТЗ. Находим два рецептора 4 и 5, закрепленных за показателем качества "реальная производительность", условно включающих испытываемое значение. Полагаем $v_4 = 0,6$, $v_5 = 0,4$. Так поступаем со всеми измеренными или предполагаемыми показателями качества.

Исключение касается некоторых рецепторов (13—18, 29, 65, 66, 71, 78), использующих не достоверность высказываний, а непосред-

ственно значения эффективности. Связи этих рецепторов при высоком значении этой эффективности усиливают вывод о высоком рейтинге исследуемых проектов. Малое значение указанной эффективности ослабляет этот вывод в пользу других нейронов, не зависящих от этих рецепторов, в частности, в пользу нейронов, указывающих на достаточно высокий рейтинг.

Задав возбуждение рецепторов, пользователь запускает счет функции активации для всех нейронов. Максимально возбужденный нейрон указывает на значение рейтинга испытуемого проекта.

Таким образом, для каждого вновь рассматриваемого проекта или для отдельного акта его модернизации с помощью простой методики задания на рецепторах предполагаемых характеристик качества устанавливается или уточняется его рейтинг. Значение рейтинга или его дрейф при мониторинге служат выбору или отклонению проекта, а также варианта его модернизации.

Заключение

Представляется логичным в завершение данной работы привести примеры оценки качества управляющих вычислительных средств, предлагаемых сегодня. Однако приведенные здесь показатели качества оказались для них весьма строгими. Перечень большого числа этих показателей говорит о том, что мы работаем в области нечетких данных, где неопределенность и непостоянство значений, а также принимаемых решений требуют применения аппарата искусственного интеллекта. Таким аппаратом являются логические нейронные сети, оперативно вбирающие в себя любое уточнение базы знаний, отражающей предмет исследований.

Поэтому приведенную здесь систему оценки качества вычислительных средств не следует считать бесспорной и окончательной. Не приведена классификация отказов и мер противодействия, не представлены проблемы информационной безопасности и др. Наоборот, следует считать, что это первый шаг систематизации многообразных и развиваемых показателей качества вычислительных средств сложных управляющих систем, собранных в единую базу знаний для формализации логического вывода о путях модернизации и развития вычислительной базы страны.

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
2. Шаракшанэ А. С., Железнов И. Г., Ивницкий В. А. Сложные системы. М.: Высшая школа, 1977. 246 с.
3. Шаракшанэ А. С., Халецкий А. К., Морозов И. А. Оценка характеристик сложных автоматизированных систем. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
4. Пирожник В. В., Морозов Ю. В., Шаменков Н. А. Обоснование требований к вычислительной технике средств и систем воздушно-космической обороны // Военная Мысль, № 6, 2015. С. 51—61.
5. Григоренко В. М., Мельник Д. И. Основные проблемы моделирования систем и средств воздушно-космической обороны на основе перспективных информационных технологий // Военная Мысль. 2015. № 6. С. 62—67.
6. Барский А. Б. Нейросетевые методы оптимизации решений. СПб.: ИЦ "Интермедия", 2016. 312 с.
7. Барский А. Б., Мельник Д. И., Решетников А. В. Нейросетевые методы управления качеством при модернизации и развитии сложных систем в условиях финансовых и технологических ограничений // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 2. С. 107—116.
8. Барский А. Б. Параллельные информационные технологии. М.: ИНТУИТ; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 503 с.
9. Игнатушенко В. В. Организация структур управляющих многопроцессорных вычислительных систем. М.: Энергоатомиздат, 1984. 184 с.
10. Барский А. Б., Железнов Б. В., Шаменков Н. А. Высоконадежные управляющие компьютерные сети с нейросетевой адаптивной маршрутизацией на базе перспективных моделей серии "Эльбрус" // Информационные технологии. 2018. Т. 24, № 5. С. 291—298.
11. Бабаян Б. А. Защищенные информационные системы. URL: http://www.mcst.ru/SECURE_INFORMATION_SYSTEM_v5_2r.pdf
12. Ким А. К., Перекатов В. И., Ермаков С. Г. Микропроцессоры и вычислительные комплексы семейства "Эльбрус". СПб.: Питер, 2013. 272 с.
13. Барский А. Б. История российских суперкомпьютеров специального назначения: свидетельства и размышления // Информационные технологии. № 9. 2012. Приложение. 32 с.
14. Барский А. Б., Мельник Д. И. Сетевая технология проектирования асинхронной вычислительной системы на общем решающем поле с самоуправляемой параллельной обработкой данных // Информационные технологии. 2018. Т. 24, № 12. С. 763—771.
15. Барский А. Б., Шилов В. В. Оптимизация ветвления при решении задачи сортировки на процессоре EPIC-архитектуры // Информационные технологии. 2005. № 1. С. 26—34.
16. Барский А. Б., Шилов В. В. Оптимизация предикатных вычислений при решении задач поиска на процессоре EPIC-архитектуры // Информационные технологии. 2005. № 5. С. 2—5.
17. Бурцев В. С. Система массового параллелизма с автоматическим распределением аппаратных средств супер-ЭВМ в процессе решения задачи // Юбилейный сборник Трудов институтов ОИВТА РАН. Т. II. М.: ОИВТА РАН, 1993. С. 5—27.
18. Змеев Д. Н., Климов А. В., Левченко Н. Н., Окунев А. С., Стемповский А. Л. Поточковая модель вычислений как парадигма программирования будущего // Информатика и ее применение. 2015. Т. 9, Вып. 4. С. 29—36.

A. B. Barsky, D. Sc., Professor, e-mail: arkbarsk@mail.ru,
D. I. Melnik, PhD, Senior Researcher, e-mail: mdi_dim@mail.ru,
V. V. Pirozhnik, PhD, Senior Researcher, e-mail: vovanina56@mail.ru,
Scientific Research Institute (Moscow) Central Research Institute VVKO, Ministry of Defense of Russia

Model of Quality Management of Computing Facilities of a Distributed Multi-Channel Queuing System

The indicators of the quality of computational facilities that control a distributed multi-channel queuing system are given. The main indicator of quality, ensuring the use of computational tools in control systems, is the actual performance. It is determined by control or functional tasks. For the proposed projects of computing means or projects of their modernization as a result of tests or by an expert, the expected quality characteristics are found. According to them is the rating of such projects when they are used in a distributed multi-channel queuing system. Rating is found by associative comparison with known, proposed or conditional projects of a known rating. The rating may take the following values: high, high enough, taking into account possible improvements, medium successful, suggesting further development of scientific and technical research, medium, indicating a wrong or technologically inaccessible way to choose a solution, but deserving attention for lack of other choice, low at which development must be rejected.

The decision system is built on a logical neural network to assess the quality of the processor (microprocessor), a logical neural network to assess the quality of integration of the VS and VC, a logical neural network to assess the quality of the network interaction of computing facilities, and a logical neural network for expert and difficult to verify evaluations of the quality of computing means.

Keywords: peak performance, real performance, structural reliability, functional reliability, safe computing, neural network rating system

DOI: 10.17587/it.25.358-367

References

1. Buslenko N. P. Complex systems Simulation, Moscow, Nauka, 1978, 400 p. (in Russian).
2. Sharakshane A. S., Zhelezov I. G., Ivnickij V. A. Complex systems, Moscow, Vysshaja shkola, 1977, 246 p. (in Russian).
3. Sharakshane A. S., Haleckij A. K., Morozov I. A. Evaluation of the characteristics of complex automated systems, Moscow, Mashinostroenie, 1993, 272 p. (in Russian).
4. Pirozhnik V. V., Morozov J. V., Shamenkov N. A. *Voennaja Mysl'*. 2015, no.6, pp. 51–61 (in Russian).
5. Grigorenko V. M., Mel'nik D. I. *Voennaja Mysl'*, 2015, no.6, pp. 62–67 (in Russian).
6. Barskij A. B. Neural network methods for optimizing solutions, SPb, IC "Intermedija", 2016, 312 p. (in Russian).
7. Barskij A. B., Mel'nik D. I., Reshetnikov A. V. *Informacionnye Tehnologii*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 107–116 (in Russian).
8. Barskij A. B. Parallel Information Technology, Moscow, INTUIT; BINOM. Laboratorija znanij. 2013, 503 p. (in Russian).
9. Ignatushhenko V. V. Organization of multiprocessor control computer structures, Moscow, Energoatomizdat, 1984, 184 p. (in Russian).
10. Barskij A. B., Zhelenkov B. V., Shamenkov N. A. *Informacionnye Tehnologii*, 2018, no.5, vol. 24, pp. 291–298 (in Russian).
11. Babajan B. A. Protected Information Systems, available at: http://www.mcst.ru/SECURE_INFORMATION_SYSTEM_v5_2r.pdf
12. Kim A. K., Perekatov V. I., Ermakov S. G. Microprocessors and computing complexes of the Elbrus family, SPb, Piter, 2013, 272 p. (in Russian).
13. Barskij A. B. *Informacionnye Tehnologii, Prilozhenie*, 2012, no. 9, 32 p. (in Russian).
14. Barskij A. B., Mel'nik D. I. *Informacionnye Tehnologii*, 2018, no. 12, vol. 24, pp. 763–771 (in Russian).
15. Barskij A. B., Shilov V. V. *Informacionnye Tehnologii*, 2005, no. 1, pp. 26–34 (in Russian).
16. Barskij A. B., Shilov V. V. *Informacionnye Tehnologii*, 2005, no. 5, pp. 2–5 (in Russian).
17. Burcev V. S. *Jubilejnyj sbornik trudov institutov OIVTA RAN*, Moscow, OIVTA RAN, 1993, pp. 5–27 (in Russian).
18. Zmeev D. N., Klimov A. V., Levchenko N. N., Okunev A. S., Stempkovskij A. L. *Informatika i ejo Primenenie*, 2015, vol. 9, iss. 4, pp. 29–36 (in Russian).

А. В. Жарков, зам. начальника науч.-техн. центра, e-mail: ajarkov@npomis.ru,
Научно-производственное объединение "Мобильные Информационные Системы"

Формирование классификационных признаков распознавания объектов при использовании лазерно-локационных средств их сканирования

Задачу эффективной селекции наземных объектов по результатам использования лазерно-локационного сканирования можно решить при условии достоверного выделения объекта на фоне сложного маскирующего рельефа. Результатом распознавания является идентификация (присвоение рассматриваемому объекту надлежащего и однозначного названия) или классификация (определение принадлежности объекта к заданному классу с оценкой его координат). Идентификация или классификация объектов проводится на основе априорного словаря признаков и алфавита разбиения их на классы.

В статье рассматривается задача формирования априорного алфавита классов на основе априорно составленного словаря признаков распознавания объектов по результатам воздушного лазерно-локационного сканирования.

Ключевые слова: лазерная локация, рельеф, словарь признаков, алфавит классов, распознавание, апостериорная вероятность, априорная вероятность, матрица выигрышей

Введение

Образцы инженерной техники и элементы поверхностного рельефа можно охарактеризовать набором признаков, каждый из которых может принимать непрерывное или дискретное значение, т. е. можно задать некоторое векторное пространство, координаты которого представляют собой пространство признаков. Разработка обобщенного алгоритма формирования пространства признаков, необходимого для надежного разделения классов образов, является одной из наиболее важных и трудоемких задач процесса создания системы с распознаванием.

Для решения задачи распознавания наземных объектов (НО) первоначально их нужно разбить на классы. На основе априорных данных об объектах следует описать на языке признаков каждый класс. Из всего перечня признаков надо выделить признаки, которые могут быть реально определены в соответствии с техническими возможностями средств наблюдения. При этом одни признаки имеют качественный характер, другие — количественный. Поэтому в описании классов должны содержаться сведения как о том, присущи или не присущи каждому классу те или иные признаки качественного характера, так и о возможных диапазонах или законах распределения значений признаков, имеющих количественные выражения для каждого класса.

При формировании рабочих алфавита и словаря признаков лазерно-локационного распознавания (ЛЛР) классов НО требуется разрешить противоречия между существующими принципами классификации НО, особенностями современных способов построения признаков пространств и возможностями лазерно-локационного комплекса по оценке информативных признаков объектов. При этом следует учесть, что принцип и детальность классификации в системе ЛЛР определяются требованиями к лазерно-локационному комплексу, которые, в свою очередь, зависят от того, какие решения формируются надсистемой — системой управления, либо оператором-дешифровщиком — по результатам распознавания.

Совокупности признаков, на языке которых проводятся как априорное описание классов НО, так и апостериорное описание распознаваемых НО, необходимые для распознавания в тех или иных алфавитах классов, образуют признаки пространства или, иначе, априорные словари признаков. Априорный словарь признаков включает признаки, относительно которых может быть получена априорная информация, необходимая для описания классов на языке этих признаков с учетом сформулированных принципов распознавания.

Информация, используемая для ЛЛР, содержится в совокупности сигналов, принимаемых лазерной системой. Однако чаще всего, чтобы

распознать объект, используют определенные измеренные его признаки, которые сопоставляют в соответствии с алгоритмами распознавания (решающими правилами) с известными (эталонными) признаками, совокупность которых образует рабочий словарь признаков.

Для обеспечения требуемой детальности распознавания по ограниченному числу признаков необходимо использовать некоторую иерархическую схему классификации целей и определить в ней место синтезируемым алгоритмам ЛЛР класса НО, результаты которого используются для получения необходимой для принятия решений информации.

Задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: в условиях априорного описания исходного множества объектов на языке априорного словаря признаков необходимо в пределах выделенных ресурсов определить оптимальный алфавит классов и оптимальный рабочий словарь признаков, которые при наилучшем решающем правиле обеспечивают наиболее эффективное использование решений, принимаемых по результатам распознавания объектов системой управления.

Формирование пространства признаков распознавания наземных объектов

В связи с тем, что высота носителя априори неизвестна и изменяется в некоторых пределах, пространство результатов измерений дальности до поверхности рельефа не может служить информативным признаком отдельных объектов. Поэтому в соответствии с методами распознавания при определении производных элементов и их отношений для конкретных наземных объектов инженерной техники используют отличительные признаки в приведенном к подстилающей поверхности пространстве, что позволяет резко сузить круг поиска отличительных признаков. На первый план выступают признаки, характеризующие продукт инженерного творчества человека. Так, например, конструкцию объектов инженерной техники можно представить набором простых геометрических форм, т. е. она будет иметь преимущественно прямые линии (края), прямые углы, а ее двумерное отображение на заданной высоте будет описываться конечным числом многоугольников.

Более информативные характеристики объектов инженерной техники можно получить из описания их формы, имеющей характерные признаки для каждого класса объектов (железнодорожный транспорт, самолеты на стоянке и т. д.). Например, горизонтальная проекция

объектов бронетанковой техники на высоте $h > 2,7$ м в первом приближении представляет собой прямоугольник с соотношением сторон 1,8:2,3, а железнодорожные четырехосные вагоны на высоте 2...4 м имеют соотношение сторон 4:6. Естественно, что такие признаки формы объектов, как протяженность, не всегда могут быть приняты за отличительный признак, поскольку в зависимости от условия встречи носителя с объектом и формы объекта, к примеру, воздушных линий электропередач, данный признак изменяется в очень больших пределах. Поэтому целесообразно использовать более информативные признаки наземных объектов.

В качестве таких признаков с учетом структуры отраженных полезных сигналов при лазерно-локационной съемке можно принять:

- перепад высоты, который отсчитывается от поверхности Земли до максимального значения высоты;
- крутизну изменения высоты объектов, т. е. приращение высоты на единицу длины, отсчитанной на поверхности Земли;
- степень изрезанности высот объекта;
- интенсивность отраженного импульса;
- координаты и скорость движения объектов (для подвижных объектов) — траекторные признаки.

Косвенные или вспомогательные признаки объектов можно получить из анализа сцены на поверхности: взаимное расположение объектов, характер рельефа, наличие той или иной растительности, водных поверхностей, явно определяемых объектов инфраструктуры (мостов, дорог, взлетно-посадочных полос, коммуникаций и др.). Лазерные изображения достоверно совмещаются с изображениями от других средств: оптических, оптико-электронных, радиоэлектронных, фотографических, что позволяет получать полную информацию о наблюдаемых объектах и местности.

Чтобы можно было отличить искусственный объект от природного, необходимо, чтобы его крутизна превышала крутизну элементов рельефа. В большинстве практических случаев это условие соблюдается.

Следует выбирать такие параметры формы, которые инвариантны к условиям встречи носителя и распознаваемого объекта. Таким параметром может служить, например, коэффициент формы

$$K_{\text{ф}} = L^2/S,$$

где L — периметр контура двумерного изображения; S — площадь изображения или ее сечение на заданной высоте.

Площади проекции объектов при построчном разложении изменений можно непосредственно определять в процессе сканирования изображения путем суммирования длин отрезков в проекции фигуры с учетом масштаба разложения. Измерение периметра связано с выполнением промежуточных операций и вычислений.

В качестве признака объекта также может служить коэффициент изменения по высоте $\sigma(H)/H$. Указанный признак проявляется при распознавании таких объектов, как дерево, кусты, трава и другие, для которых размер светового пятна меньше отражающего элемента.

По выбранным признакам объемных изображений необходимо разделить сходные между собой изображения на однородные классы, идентифицировать и определить координаты местоположения объектов на фоне подстилающей поверхности.

Особенности решения задачи составления априорного алфавита классов и априорного словаря признаков

Задача составления априорного алфавита классов состоит в определении принципа классификации и разбиении множества объектов в соответствии с выбранным принципом на априорно заданное множество классов.

Пусть задано множество НО $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_z\}$, а также множество возможных управлений (стратегий) $\mathbf{L} = \{l_1, \dots, l_k\}$, которые могут быть приняты по результатам решения задачи распознавания НО.

Введем в рассмотрение множество возможных вариантов разбиения всей возможной совокупности НО на классы $\mathbf{A} = \{A_1, \dots, A_r\}$.

Будем полагать, что если выбран вариант разбиения A_α , $\alpha = \overline{1, r}$, то множество Ω подразделяется на m_α классов, т. е.

$$A_\alpha : \Omega_q^{A_\alpha} \cap \Omega_g^{A_\alpha} = \emptyset, q, g = \overline{1, m_\alpha}, \Omega_q, \Omega_g \subset \Omega,$$

где $\bigcup_{i=1}^{m_\alpha} \Omega_i^{A_\alpha} = \Omega$, q, g — классы НО.

Информация относительно множества управлений $\mathbf{L} = \{l_1, \dots, l_k\}$ позволяет провести исходное разбиение множества объектов на классы — составить априорный алфавит классов. В этом первом варианте разбиения НО на классы $\alpha = 1$, т. е. когда $A_\alpha = A_1$, их число равно $m_\alpha = m_1 = k + 1$. Исходное множество объектов $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_z\}$ подразделим на подмножества — классы:

$$\Omega \supseteq \{\Omega_1^{A_1}, \Omega_2^{A_1}, \dots, \Omega_{m_1}^{A_1}\}.$$

НО предъявляются для распознавания не непосредственно, а в виде некоторой совокупности наблюдений, образующей контрольную выборку и обычно представляемой в виде матрицы [1]

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pn} \end{pmatrix}.$$

Каждый столбец $x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi})^T$, $i = \overline{1, n}$, матрицы \mathbf{X} представляет собой p -мерный вектор наблюдаемых значений признаков X_1, X_2, \dots, X_p , являющихся безразмерными переменными (n — размерность выборки). Совокупность признаков X_1, X_2, \dots, X_p образует пространство признаков ЛЛР.

Пусть первоначальная информация позволяет построить априорное признаковое пространство (составить априорный словарь признаков), описываемое многомерным вектором

$$\mathbf{X}_{pr} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{p_{pr}}\}, \mathbf{X}_j = \{x_{j1}, \dots, x_{jn}\}, j = \overline{1, p_{pr}}.$$

Очевидно, что совокупность признаков должна в наибольшей степени отражать те свойства объектов, которые важны для распознавания. При этом от размерности p признакового пространства в значительной степени зависит вычислительная сложность процедур обучения и принятия решения, достоверность распознавания, материальные и трудовые затраты на измерение необходимых характеристик НО, т. е. на получение наблюдений на этапе обучения и принятия решений.

Если выборка \mathbf{X} достаточно представительна, то можно путем непосредственной обработки исходной информации определить описания классов. При статистическом подходе к задаче распознавания такими описаниями являются априорные вероятности появления соответствующих классов НО [2]

$$\mathbf{P}_{pr} = \{P_q\}_{q=1}^{m_\alpha}, \text{ где } P_q = P(\omega \in \Omega_q^{A_\alpha}), \sum_{q=1}^{m_\alpha} P_q = 1,$$

а также условные многомерные плотности распределения значений признаков по классам, т. е. функции $f_q = f(\mathbf{X}_{pr} | \Omega_q^{A_\alpha})$.

Если объем исходной информации недостаточен для непосредственного описания классов НО, то они могут быть получены с помощью процедуры обучения [3, 4]. На этапе обучения при наблюдении НО определенного класса по результатам измерений каждого признака из множества \mathbf{X}_{pr} формируются характерные области значений и законы распре-

деления признаков, которые ставятся в соответствие каждому классу НО и образуют обучающую выборку.

Наличие описаний классов НО в принципе позволяет определить решающие правила (решающие границы), с помощью которых обеспечивается минимизация ошибок при распознавании неизвестных НО. Разбиение пространства признаков на области, однозначно отождествляющие предъявляемые для ЛЛР классы НО, также должно быть выполнено в некотором смысле рациональным образом. Это означает, что в пространстве признаков требуется выделить области D_1, \dots, D_{m_α} , эквивалентные классам. В алгебраической трактовке этой задачи требуется построить в данном пространстве разделяющие функции $F_i(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_{p_{pr}})$, $i = 1, m_\alpha$, обладающие следующим свойством: если $\mathbf{X}_q = \{X_1, \dots, X_{p_{pr}}\}$ обозначает вектор признаков объекта, принадлежащего к классу Ω_q , то для всех значений вектора \mathbf{X}_q

$$F_q(\mathbf{X}_q) > F_g(\mathbf{X}_q); \quad q, g = 1, \dots, m; \quad q \neq g.$$

Пусть в результате наблюдения объекта ω класса q вектор измеренных признаков принял значение \mathbf{x} . Тогда в признаковом пространстве системы распознавания граница областей, определяющая правила принятия решений, выражается уравнением

$$d_\alpha : F_q(\mathbf{x}) - F_g(\mathbf{x}) = 0, \quad q \neq g.$$

При решении задачи распознавания мера близости в виде разделяющей функции или функции принадлежности может быть дополнена некоторыми другими условиями, например, весами отдельных признаков или стоимостью принятия тех или иных решений [5]. В алгоритмах распознавания, базирующихся на использовании вероятностных признаков, в качестве меры близости используется риск, связанный с решением о принадлежности распознаваемого объекта к какому-либо классу [6].

Обозначим $C_\alpha = \{c_{qg}^{(\alpha)}\}$, $q, g = 1, m_\alpha$, матрицу выигрышей $c_{qq}^{(\alpha)}$ (штрафов $c_{qg}^{(\alpha)}$, $q \neq g$; $q, g = 1, m_\alpha$), связанных с реализацией возможных решений системой управления или оператором-дешифровщиком при распознавании НО ω , правильно отнесенного к классу $\Omega_q^{A_\alpha}$ (ошибочно отнесенного к классу $\Omega_g^{A_\alpha}$) в варианте классификации A_α .

Если $P_{\text{пр}}(\Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{X}_{pr})$ — оценка апостериорной вероятности того, что $\omega \in \Omega_q^{A_\alpha}$ при условии наблюдения \mathbf{x} , усредненная по всем возможным значениям признаков априорного словаря, описываемого вектором \mathbf{X}_{pr} , то значение

риска, связанного с решением $\omega \in \Omega_g^{A_\alpha}$ в варианте классификации A_α определяется как

$$R_\alpha(\omega \in \Omega_g^{A_\alpha} | \mathbf{x}) = \sum_{q=1}^{m_\alpha} \overline{P_{\text{пр}}}(\Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{X}_{pr}) c_{qg}^{(\alpha)},$$

где $c_{qg}^{(\alpha)}$ — элемент платежной матрицы C , определяющий стоимость принятия решения о принадлежности наблюдаемого объекта классу g , когда на самом деле он принадлежит классу q .

Апостериорная вероятность $P_{\text{пр}}(\Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{x})$ правильного решения задачи распознавания определяется в соответствии с известной формулой Байеса[7], а решение вида $\omega \in \Omega_g^{A_\alpha}$ принимается в случае, если

$$R_\alpha(\omega \in \Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{x}) = \min_{i=1, m_\alpha} R_\alpha(\omega \in \Omega_i^{A_\alpha} | \mathbf{x}).$$

Оценка $\overline{P_{\text{пр}}}(\Omega_q^{A_\alpha} | \mathbf{X}_{pr})$ может быть получена путем проведения статистических испытаний (метод Монте-Карло) математической модели системы ЛЛР.

Если нет ограничений на объем ресурсов, ассигнованных на построение измерительных устройств, предназначенных для определения признаков $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{p_{pr}}$, то можно полагать, что основные характеристики системы ЛЛР — алфавит классов НО и словарь признаков — определены и можно приступить к построению системы ЛЛР. В условиях ограничений, когда реализовать априорное признаковое пространство $\mathbf{X}_{pr} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{p_{pr}}\}$ в полном объеме невозможно, приходится признаковое пространство по сравнению с априорным сокращать, т. е. переходить от априорного словаря признаков к рабочему.

Заключение

Задача составления априорного алфавита классов и априорного словаря признаков НО для системы ЛЛР является актуальной.

Уменьшение числа классификационных признаков снижает затраты на проведение измерений и вычислений, но может привести к падению достоверности распознавания. Если время на обучение и принятие решений жестко ограничено, то повышение размерности признакового пространства может оказаться единственным средством увеличения достоверности до требуемого уровня. Таким образом, с практической точки зрения требования минимума общей размерности задачи распознавания и максимума достоверности оказываются в противоречии. Из этого факта следует большая важность правильного (рационального) форми-

рования алфавита классов и словаря признаков. При этом необходимо учитывать, что система ЛЛР классов НО в составе лазерно-локационного комплекса съемки должна обеспечить наибольшую эффективность действий системы управления и оператора, и, значит, ее алфавит классов целесообразно расширять в пределе до величины $m_\alpha = m_1 = k + 1$, где k — число управленческих решений. Однако при заданном словаре признаков (определяемом возможностями измерительной системы лазерно-локационного комплекса) увеличение числа классов уменьшает вероятность правильного решения задачи распознавания, что сопряжено с уменьшением эффективности системы ЛЛР.

Только некоторый компромисс между размерами алфавита классов и объемом рабочего словаря признаков системы, базирующийся на исходных данных относительно набора возможных решений системы управления и объема ресурсов, которые отпущены на создание измерительной аппаратуры (в данном случае

с учетом энергетических и вычислительных ресурсов лазерно-локационного комплекса и ограничений на время обучения и принятия решений), реализующей словарь признаков, позволяет обеспечить решение задачи построения системы ЛЛР оптимальным образом.

Список литературы

1. Цыпкин Я. З. Основы теории обучения систем. М.: Наука, 1970. 251 с.
2. Фомин Я. А., Тарловский Г. Р. Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
3. Горелик А. Л., Гуревич И. Б., Скрипкин В. А. Современное состояние проблемы распознавания: Некоторые аспекты. М.: Радио и связь, 1985. 161 с.
4. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
5. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. М.: Мир, 1989. 376 с.
6. Шибанов Г. П. Распознавание в системах автоконтроля. М.: Машиностроение, 1973. 424 с.
7. Харт П., Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 509 с.

A. V. Zharkov, Deputy Head of the Science and Technology Center, ajarkov@npomis.ru,
Scientific and Production Corporation "Mobile Information Systems"

Formation of Classification Signs of Object Recognition when Using Laser-Location Means of their Scanning

The task of effective selection of ground-based objects based on the results of the use of laser means of scanning them can be solved provided that the object is reliably selected against the background of a complex masking relief. The recognition result will be identification (assignment of the proper and unambiguous name to the object in question) or classification (determination of the object's belonging to a given class with an estimate of their coordinates). Identification or classification of objects is made on the basis of an a priori dictionary of attributes and the alphabet of their division into classes. In the self-learning recognition system, the feature dictionary can be filled (corrected). The development of a generalized algorithm for the formation of a feature space required for reliable separation of image classes is one of the most important and time-consuming tasks of creating a system with recognition, since in most cases the distinctive features do not have clear boundaries and cannot always be formalized. Selection of features can be carried out in the measurement space and the transformed space. Reducing the number of features reduces the cost of carrying out measurements and calculations, but can lead to a drop in the reliability of recognition. If the time for training and decision making is severely limited, then increasing the dimensionality of the attribute space may be the only means of increasing the reliability to the required level. Thus, from a practical point of view, the requirements of the minimum of the overall dimension of the problem of recognition and the maximum of confidence are in conflict. In this article, the author examines the task of forming an a priori alphabet of classes, based on an a priori compiled dictionary of object recognition features from the results of an airborne laser radar scan.

Keywords: laser location, relief, feature dictionary, class alphabet, recognition, a posteriori probability, a priori probability, matrix of winnings

DOI: 10.17587/it.25.368-372

References

1. Tsypkin Ya. Z. Fundamentals of the theory of teaching systems, Moscow, Nauka, 1970, 251 p. (in Russian).
2. Fomin Ya. A. Tarlovskiy G. R. Statistical Pattern Recognition Theory, Moscow, Radio i Svyaz, 1986, 264 p. (in Russian).
3. Gorelik A. L., Gurevich I. B., Skripkin V. A. The current state of recognition problems: Some aspects. Moscow, Radio i Svyaz, 1985, 161 p. (in Russian).
4. Dubua D., Prade A. Theory of Opportunities, Moscow, Radio i Svyaz, 1982, 432 p. (in Russian).
5. Cooper J., McGill C. Probabilistic methods for analyzing signals and systems, Moscow, Mir, 1982, 376 p. (in Russian).
6. Shibanov G. P. Identification systems of automatic control, Moscow, Mashinostroenie, 1973, 424 p. (in Russian).
7. Hart P., Duda R. Pattern recognition and scene analysis, Moscow, Mir, 1976, 509 p. (in Russian).

Л. А. Кромина, канд. техн. наук, e-mail: luyda-kr@yandex.ru,
Уфимский государственный авиационный технический университет,
Р. А. Ярцев, д-р филос. наук, канд. техн. наук, доц., e-mail: rust-66@yandex.com

Об учете авторской значимости литературных ссылок при оптимизации заказа книжных изданий для библиотеки вуза

В целях модернизации способа заказа книжных изданий, основу которого составляет их ранжирование по числу ссылок на ранее использованные авторами вуза источники, предлагается назначать каждой вузовской ссылке вес, вычисляемый по авторским индексам цитирования ссылающегося труда, что позволяет точнее определять и полнее удовлетворять информационные потребности вуза.

Ключевые слова: вуз, библиотека, издание, заказ, оптимизация, литературная ссылка, информационный вес, авторский индекс, база значимых ссылок, взвешенный индекс цитирования, взвешенный рейтинг издания

Введение

Процесс информатизации в современном мире, являясь одной из ведущих тенденций научно-технического прогресса, затрагивает также сферу высшего образования, где актуализация качества обучения требует постоянного поиска и внедрения все более эффективных информационных систем, автоматизирующих как учебный процесс, так и управленческую деятельность вуза [1, 2]. Применительно к задачам комплектования книжного фонда учебного заведения одной из таких систем является предложенная авторами ранее автоматизированная система формирования оптимального заказа учебных и научных изданий, которая основана на максимизации их общего рейтинга, отражающего степень удовлетворения заказом информационных потребностей вуза [3–7]. Данный рейтинг складывается из рейтингов отдельных изданий, рассчитываемых по локальным индексам цитирования ссылочных источников издания, находящихся в базе значимых ссылок, куда попадают все издания, на которые когда-либо ссылались в своих трудах авторы вуза [4–6]. При этом локальный индекс цитирования каждого издания базы рассчитывается как общее число значимых ссылок издания, т. е. суммарное число ссылок на него во всех вузовских публикациях [3, 5–7].

Таким образом, предложенная система оптимизации заказа литературы для вуза основана на вводимом понятии значимой ссылки, выступающей в качестве единицы измерения информационных потребностей вуза. Данный подход является попыткой дополнить метод экспертных оценок [8–11] в условиях, когда привлечение экспертов к формированию заказа литературы в вуз затруднено, путем перехода к формализованной количественной оценке закупаемых книжных изданий, позволяющей, на наш взгляд, более объективно отражать профессиональные интересы всех сотрудников и, следовательно, информационные потребности вуза в целом.

Первой редакцией подхода неявно предполагалось, что все значимые ссылки имеют одинаковую информационную ценность, и поэтому любая из них может быть принята за единицу для вычисления индексов цитирования и рейтингов изданий. Данное положение, которое можно назвать принципом информационной равноценности значимых ссылок, становится объектом критики настоящей статьи, где обосновывается необходимость его замены на принцип ссылочной неравноценности, позволяющий более точно определять информационные потребности вуза в целях усовершенствования предлагаемого подхода к заказу книжных изданий. Также рассматривается одна из возможных реализаций нового принципа, осно-

ванная на введении информационного веса ссылки, определяемого по такому объективному показателю ссылающегося труда, как авторский индекс цитирования, актуальной разновидностью которого является индекс Хирша [12—16]. Уточняется порядок расчета рейтингов заказываемых изданий в условиях взвешенных ссылок, на основе чего проводится коррекция задачи оптимизации заказа, решение которой иллюстрируется примером.

1. Недостаток существующего процесса комплектования книжного фонда вуза и его устранение путем введения ссылочной неравноценности

Критикуя принцип информационной равноценности литературных ссылок, использованный в существующей системе заказа книжных изданий путем их ранжирования по рейтингам, отражающим информационные потребности вуза, не следует отрицать любую возможность его эффективного применения для достижения заявленных целей. Ведь хотя бы гипотетически нельзя исключать ситуацию, когда все осуществляемые вузом научные и методические проекты в равной степени необходимы для его успешного функционирования, вследствие чего любая ссылка в профессиональных трудах участников этих проектов будет иметь одинаковый ценностный вес при определении информационных потребностей учебного заведения. Однако с практической точки зрения такая ситуация выглядит грубым упрощением, потому что значимость вузовских исследований допускает различные оценки и не является постоянной. Отсюда правильным для рассматриваемой информационной системы решением становится не отказ от принципа равноценности ссылок, а его замена более общим принципом, включающим первоначальный принцип как возможный частный случай.

Иначе говоря, требуется усовершенствовать существующую систему оптимизации заказа изданий в процессе комплектования книжного фонда вуза, реализовав в ней новый принцип оценки информационных потребностей учебного заведения, предусматривающий ссылочную неравноценность. Простейшей реализацией этого принципа видится назначение каждой ссылке определенного информационного веса, который бы мог количественно выразить информационную потребность вуза в ссылочном источнике, основываясь прежде всего на на-

учной и образовательной значимости ссылающегося вузовского труда, информационная потребность которого удовлетворяется данным источником. Такая цель будет достигнута, если, например, вес ссылки удастся функционально связать со значениями тех наукометрических показателей, с помощью которых обычно оценивается значимость опубликованного труда в научном мире и системе образования.

Наиболее простой и очевидной идеей здесь оказывается назначение в качестве информационного веса ссылки такого распространенного показателя, как индекс цитирования труда, понимаемого как общее число ссылок на данный труд за определенный период и напрямую характеризующего востребованность любого издания среди специалистов. Однако этот показатель совершенно не подходит для оценки недавних вузовских публикаций, чьи информационные потребности также должны быть учтены. Более перспективным средством достижения нашей цели представляется авторский индекс цитирования, разновидностью которого выступает распространенный в настоящее время индекс Хирша. Несмотря на то, что адекватность этого показателя содержательной значимости исследований в некоторых случаях сомнительна [12, 13, 16], для вузовской среды с ее требованиями регулярной публикационной активности он приобретает дополнительное значение в качестве объективного критерия эффективности выполнения сотрудниками условий контракта. Поэтому, признавая невозможность точного измерения действительных информационных потребностей вуза с помощью каких бы то ни было формальных показателей, мы все же считаем правомерным оценивать данные потребности приблизительно, в соответствии со сравнительной важностью вузовских проектов, определяемой с помощью индексов цитирования всех авторов. Для нашей системы заказа это означает придание каждой литературной ссылке информационной ценности или веса, рассчитываемого по индексам цитирования авторов ссылающегося труда и используемого в качестве оценки потребности вуза в ссылочном источнике.

При этом значения индексов цитирования для конкретных авторов не обязательно вычислять и хранить в самой системе заказа литературы, а можно воспользоваться данными таких баз общего пользования, как e-library.ru, РИНЦ, ядро РИНЦ, Web of Science, Scopus. Например, сведения об индексе Хирша специалистов любого вуза можно найти на сай-

те электронной библиотеки <https://elibrary.ru>. Объективность же получаемых оценок можно повысить, если в расчетах ссылочного веса учесть следующие требования:

1) информационный вес незначимых ссылок, сделанных посторонними для вуза авторами, принимается равным нулю (демаркация информационных потребностей вуза);

2) информационный вес значимой ссылки принимает положительное значение даже в том случае, если все авторы ссылающегося труда из вуза имеют нулевой индекс цитирования (учет потребностей начинающих авторов);

3) индекс цитирования всех авторов не учитывает самоцитирований (нейтрализация само-рекламы при определении потребностей вуза);

4) рост индекса цитирования любого автора вуза обуславливает увеличение информационного веса каждой ссылки из его трудов (чувствительность потребностей вуза к спросу на публикации сотрудников);

5) рост числа вузовских авторов ссылающегося труда не влечет за собой увеличения информационного веса его ссылок (защита потребностей от приписывания авторства).

Разумеется, исполнение перечисленных требований опять же не гарантирует полной объективности определения информационных потребностей вуза по назначаемым таким образом ссылочным весам, поскольку всегда остается возможность недобросовестных манипуляций с повышением наукометрических показателей. Однако использование таких показателей обеспечивает гораздо более объективное решение поставленной оценочной задачи, чем привлечение сотрудников вуза в качестве экспертов, требуемое альтернативным методом экспертных оценок [8–11].

2. Вес литературной ссылки и локальные индексы цитирования

В соответствии с предлагаемым подходом [3, 6, 7] о наличии литературной ссылки между ссылающимся трудом \tilde{T} и ссылочным источником T можно судить по единичному значению параметра литературной ссылки $\sigma(\tilde{T}, T)$, определяемого следующим образом:

$$\sigma(\tilde{T}, T) = \begin{cases} 1, & \text{если труд наименования } \tilde{T} \\ & \text{ссылается на труд} \\ & \text{наименования } T, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

При этом ссылка называется значимой, если единице равен параметр локализации литературы по авторам $\alpha(\tilde{T})$, принимающий данное значение в том и только в том случае, если хотя бы одна персона с порядковым номером ω из числа авторов труда \tilde{T} работает в вузе, т. е.:

$$\alpha(\tilde{T}) = \begin{cases} 1, & \text{если } (\exists \omega)((1 \leq \omega \leq k(\tilde{T})) \wedge \\ & \wedge (\gamma(\omega, \tilde{T}) = 1)); \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $k(\tilde{T})$ — число авторов \tilde{T} ; $\gamma(\omega, \tilde{T})$ — параметр локализации автора ω труда \tilde{T} :

$$\gamma(\omega, \tilde{T}) = \begin{cases} 1, & \text{если автор труда } \tilde{T} \text{ с номером } \omega \\ & \text{работает в вузе,} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

Теперь можно ввести функцию **информационного веса литературной ссылки** $\tilde{\sigma}(\tilde{T}, T)$, которая будет удовлетворять требованиям предыдущего раздела, принимая одно из трех возможных значений:

- среднее арифметическое индексов цитирования $h(\omega, \tilde{T})$ всех авторов ω труда \tilde{T} , работающих в вузе (для которых $\gamma(\omega, \tilde{T}) = 1$), если \tilde{T} ссылается на труд T (т. е. $\sigma(\tilde{T}, T) = 1$) и хотя бы один из усредняемых таким образом индексов отличен от нуля;
- единица, если индекс цитирования $h(\omega, \tilde{T})$ всех авторов ω труда \tilde{T} , работающих в вузе, причем \tilde{T} ссылается на T , принимает нулевое значение;
- ноль во всех остальных случаях.

С учетом параметров литературной ссылки $\sigma(\tilde{T}, T)$ и локализации литературы $\alpha(\tilde{T})$ расчетную формулу для $\tilde{\sigma}(\tilde{T}, T)$ можно записать в следующем виде:

$$\tilde{\sigma}(\tilde{T}, T) = \begin{cases} \frac{\sum_{\omega=1}^{k(\tilde{T})} h(\omega, \tilde{T}) \gamma(\omega, \tilde{T})}{\sum_{\omega=1}^{k(\tilde{T})} \gamma(\omega, \tilde{T})} \sigma(\tilde{T}, T), & \text{если} \\ \exists \omega'(1 \leq \omega' \leq k(\tilde{T})) \wedge \\ \wedge (\gamma(\omega', \tilde{T}) = 1) \wedge (h(\omega', \tilde{T}) > 0); \\ \sigma(\tilde{T}, T), & \text{если} \\ \forall \omega'((1 \leq \omega' \leq k(\tilde{T})) \wedge (\gamma(\omega', \tilde{T}) = 1) \Rightarrow \\ \Rightarrow (h(\omega', \tilde{T}) = 0)); \\ 0, & \text{если } \alpha(\tilde{T}) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Так, например, если из четырех авторов ссылаемого издания трое являются сотрудниками

вуза и имеют индексы Хирша без учета самоцитирований, равные 6, 3 и 9 соответственно, то информационный вес любой литературной ссылки из данного издания будет равен 6.

Дальнейшие предлагаемые изменения в системе заказа связаны с тем, что каждой значимой ссылке соответствует некоторый ссылочный источник, совокупность которых образует так называемую базу значимых ссылок [4—6]. В условиях, когда действует принцип равноценности ссылок, важнейшей характеристикой каждого источника T базы служит локальный индекс цитирования $I(T, m)$, введенный ранее как число значимых ссылок на этот источник всех трудов \tilde{T} по специальности или направлению подготовки m , который характеризует степень востребованности T трудами специалистов вуза [3, 6, 7]. Внедрение же принципа ссылочной неравноценности требует переопределить данный показатель таким образом, чтобы суммировались не сами значимые ссылки, а их информационные веса. В результате для T мы получаем аналогичную характеристику $\tilde{I}(T, m)$, которую будем называть **локальным взвешенным индексом цитирования** и определять следующим образом:

$$\tilde{I}(T, m) = \sum_{\substack{\langle \tilde{T} \rangle \\ (\delta(\tilde{T}, m)=1)}} \tilde{\sigma}(\tilde{T}, T). \quad (5)$$

Здесь $\delta(\tilde{T}, m)$ — параметр специализации литературы, такой что

$$\delta(\tilde{T}, m) = \begin{cases} 1, & \text{если труд наименования } \tilde{T} \\ & \text{относится к специальности/} \\ & \text{/направлению подготовки } m; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Например, если на некоторое издание из базы имеются три значимые ссылки, информационные веса которых соответственно равны 6, 2 и 5, то локальный взвешенный индекс цитирования данного издания составит 13.

Новые взвешенные индексы цитирования отличаются от ранее введенных локальных индексов еще и тем, что их значения изменяются не только по мере поступления новых ссылочных данных из публикаций сотрудников вуза, но и по мере обновления авторских индексов цитирования для уже имеющихся вузовских публикаций. Это обстоятельство следует учитывать, проводя перерасчет данных показателей в ходе формирования каждого конкретного заказа литературы для вуза.

3. Взвешенные рейтинги изданий и рейтинговые ограничения

Аналогичным образом путем поправки на информационный вес уточняются понятия локального и общего рейтинга, используемые для оценки информационных потребностей вуза в каждом выбираемом из торговых каталогов новом издании по совпадениям списка ссылочной литературы издания с базой значимых ссылок [4—6]. Как известно, локальный рейтинг $R^*(i, j, m)$ издания $T(i, j)$ с номером j в каталоге i ранее был определен как сумма локальных индексов цитирования $I(T, m)$ для всех источников базы по специальности m , на которые ссылается $T(i, j)$, а общий рейтинг $R(T(i, j))$ — как сумма рейтингов $R^*(i, j, m)$ по всем специальностям вуза [3, 5—7]. Теперь же введем вместо них **локальный взвешенный рейтинг** $\tilde{R}^*(i, j, m)$, который представляет собой сумму локальных взвешенных индексов цитирования $\tilde{I}(T, m)$, и **общий взвешенный рейтинг** издания $\tilde{R}(i, j)$, определяемый как сумма взвешенных рейтингов $\tilde{R}^*(i, j, m)$, т. е.:

$$\tilde{R}^*(i, j, m) = \left[\sum_{\substack{\langle T \rangle \\ \sigma(T(i, j), T)=1}} \tilde{I}(T, m) \right]; \quad (7)$$

$$\tilde{R}(i, j) = \sum_{m=1}^0 \tilde{R}^*(i, j, m). \quad (8)$$

Выполнив подстановку формул (7) и (8) в (8), получим значение общего взвешенного рейтинга издания, выраженное через значения функции информационного веса литературной ссылки:

$$\begin{aligned} \tilde{R}(i, j) &= \sum_{m=1}^0 \left[\sum_{\substack{\langle T \rangle \\ \sigma(T(i, j), T)=1}} \tilde{I}(T, m) \right] = \\ &= \sum_{m=1}^0 \left[\sum_{\substack{\langle T \rangle \\ \sigma(T(i, j), T)}} \sum_{\substack{\langle \tilde{T} \rangle \\ \delta(\tilde{T}, m)=1}} \tilde{\sigma}(\tilde{T}, T) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, предлагаемая методика расчета взвешенных рейтингов каждого выбираемого для покупки издания предусматривает:

1) определение локальных взвешенных индексов цитирования по всем специальностям вуза для всех источников базы значимых ссылок согласно формуле (5);

2) расчет локальных взвешенных рейтингов издания по всем специальностям путем сум-

мирования локальных взвешенных индексов цитирования всех его ссылочных источников соответствующих специальностей из базы значимых ссылок согласно формуле (7);

3) вычисление общего взвешенного рейтинга издания как суммы локальных взвешенных рейтингов по всем специальностям вуза согласно формуле (8).

При этом вычисленный в результате общий взвешенный рейтинг необходим для построения математической модели оптимизации заказа литературы, представляющей собой совокупность трех целевых функций и множества ограничений [7]. Данная модель строится на основании следующих критериев эффективности, содержащихся в федеральных государственных образовательных стандартах высшего образования:

1) наиболее полное удовлетворение объективных информационных потребностей вуза;

2) достижение предельно возможной номенклатуры;

3) наибольшее число экземпляров заказываемых изданий [4, 7].

Так, общий взвешенный рейтинг используется для определения главной целевой функции решаемой задачи оптимизации заказа литературы, требующей максимального удовлетворения информационных потребностей вуза через достижение максимума суммарного значения данного рейтинга по всей номенклатуре заказываемых изданий, что соответствует требованиям первого критерия эффективности [4, 5, 7]:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K(i)} \tilde{R}(i, j) f(i, j) \rightarrow \max_{X \in \chi}. \quad (10)$$

Здесь N — общее число издательств; $K(i)$ — число наименований книг в каталоге i -го издательства; $f(i, j)$ — параметр пополнения номенклатуры (множества всех изданий) заказа j -й книги в каталоге i -го издательства, принимающий единичное значение только для первой книги каждого издания при их последовательном переборе, а для остальных книг равный нулю.

Если множество ненулевых решений задачи для первой целевой функции не пусто, то в нем можно осуществлять поиск решений, каждое из которых удовлетворяло бы второму критерию эффективности (по объему номенклатуры заказываемых изданий), в связи с чем вторая целевая функция может быть записана в виде

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K(i)} f(i, j) \rightarrow \max_{X \in \chi}. \quad (11)$$

Наконец, если этот поиск также оказался результативным, то в соответствии с третьим критерием эффективности (по числу экземпляров всех изданий) в задаче может быть использована следующая (третья) целевая функция:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K(i)} X(i, j) \rightarrow \max_{X \in \chi}. \quad (12)$$

Здесь $X(i, j)$ — число экземпляров книги j -й книги, которое заказывается у i -го издательства, причем $X(i, j) \geq 0$, $X(i, j) \in Z$ [3–5, 7].

Рассмотренный рейтинг, как и его невзвешенный аналог, также применим для определения числа заказываемых изданий: очевидно, что наиболее важные издания, имеющие более высокие значения $\tilde{R}(i, j)$, целесообразно заказывать и в большем количестве. Это означает необходимость внесения изменений и в так называемые рейтинговые ограничения задачи оптимизации заказа [3, 5, 7], которые теперь могут быть изложены в следующей редакции:

1) для изданий с ненулевым значением общего взвешенного рейтинга действует принцип рейтинговой пропорциональности, когда количество литературы сверх обязательных требований Минобрнауки и вуза заказывается пропорционально соотношению общих взвешенных рейтингов изданий;

2) число изданий с нулевым общим взвешенным рейтингом, заказываемое сверх обязательных требований, не должно превосходить минимума числа изданий того же вида, имеющих ненулевой общий взвешенный рейтинг (принцип рейтингового максимума).

Перейдем к формальной записи данных ограничений. Пусть $\varphi(i, j, s) = \hat{\varphi}(T(i, j), s)$ — число экземпляров издания с наименованием $T(i, j)$, заказываемое сверх установленного минимального числа $E(i, j, s)$ для числа студентов в вузе s . Тогда

$$\varphi(i, j, s) = \sum_{\substack{\langle z_1, z_2 \rangle \\ T(z_1, z_2) = T(i, j)}} X(z_1, z_2) - E(i, j, s),$$

и принцип рейтинговой пропорциональности можно будет сформулировать следующим образом: при любом s для любых значений i, j, k, l , определяющих две различные книги ($1 \leq i \leq N, 1 \leq k \leq N$ и $1 \leq j \leq K(i), 1 \leq l \leq K(k)$, при этом $i \neq k$ или $j \neq l$) одного вида ($v(i, j) = v(k, l)$), но различных наименований ($T(i, j) \neq T(k, l)$), причем данные издания имеют ненулевой общий взвешенный рейтинг ($\tilde{R}(i, j) > 0, \tilde{R}(k, l) > 0$) и заказываются

в количестве сверх установленного минимума ($\varphi(i, j, s) > 0$, $\varphi(k, l, s) > 0$), справедливо соотношение $\varphi(i, j, s)/\varphi(k, l, s) = \tilde{R}(i, j)/\tilde{R}(k, l)$.

В соответствии со сказанным для изданий с ненулевым значением общего взвешенного рейтинга первое ограничение запишется в виде:

$$\begin{aligned} & \forall(i, j, k, l, s)((1 \leq i \leq N) \wedge (1 \leq k \leq N) \wedge \\ & \wedge (1 \leq j \leq K(i)) \wedge (1 \leq l \leq K(k)) \wedge \\ & \wedge ((i \neq k) \vee (j \neq l)) \wedge (T(i, j) \neq T(k, l)) \wedge \\ & \wedge (\nu(i, j) = \nu(k, l)) \wedge (\tilde{R}(i, j) > 0) \wedge (\tilde{R}(k, l) > 0) \wedge \\ & \wedge (\varphi(i, j, s) > 0) \wedge (\varphi(k, l, s) > 0) \Rightarrow \\ & \Rightarrow \varphi(i, j, s)/\varphi(k, l, s) = \tilde{R}(i, j)/\tilde{R}(k, l) \end{aligned} \quad (13)$$

Принцип же рейтингового максимума может быть сформулирован следующим образом: для любых значений переменных i, j , определяющих некоторую книгу из каталогов ($1 \leq i \leq N$ и $1 \leq j \leq K(i)$) такую, что общий взвешенный рейтинг данного издания равен нулю ($\tilde{R}(i, j) = 0$), издание заказывается в количестве, не меньшем установленного минимума ($\varphi(i, j, s) > 0$) и существуют значения переменных k, l , определяющие по крайней мере одну другую книгу из тех же каталогов ($1 \leq k \leq N$, $1 \leq l \leq K(k)$ и $i \neq k$ или $j \neq l$) того же вида ($\nu(i, j) = \nu(k, l)$), но другого наименования ($T(i, j) \neq T(k, l)$), причем соответствующая книга имеет ненулевое значение общего взвешенного рейтинга издания ($\tilde{R}(k, l) > 0$) и заказывается в количестве сверх установленного минимума ($\varphi(k, l, s) > 0$), справедливо следующее соотношение: значение $\varphi(i, j, s)$ не превосходит минимума возможных значений $\varphi(k, l, s)$.

В соответствии с этим можно записать:

$$\begin{aligned} & \forall(i, j, s)((1 \leq i \leq N) \wedge (1 \leq j \leq K(i))) \wedge \\ & \wedge (\tilde{R}(i, j) = 0) \wedge (\varphi(i, j, s) \geq 0) \wedge \\ & \wedge \exists(k, l)[(1 \leq k \leq N) \wedge (1 \leq l \leq K(k)) \wedge \\ & \wedge ((i \neq k) \vee (j \neq l)) \wedge (T(i, j) \neq T(k, l)) \wedge \\ & \wedge (\nu(i, j) = \nu(k, l)) \wedge (\tilde{R}(k, l) > 0) \wedge \\ & \wedge (\varphi(k, l, s) > 0)] \Rightarrow \left(\varphi(i, j, s) \leq \min_{<k,l>} \{ \varphi(k, l, s) \} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Отметим, что помимо рейтинговых ограничений математическая модель задачи оптимизации заказа книжных изданий для библиотеки вуза включает множество других качественных (по тематике изданий) и количественных

(по наименованиям и видам книг, стоимости заказа с доставкой и др.) ограничений, подробно рассмотренных нами, например, в работе [7].

4. Пример применения общих взвешенных рейтингов

Использование общих взвешенных рейтингов изданий в процессе комплектования книжного фонда библиотеки вуза можно продемонстрировать на следующем гипотетическом примере, иллюстрирующем реализацию основных идей данной статьи. Примеры же из реальной библиотечной практики применения разрабатываемой автоматизированной системы с учетом прочих факторов, влияющих на принятие решений по заказу литературы, обсуждаются в наших работах [3–6].

Пусть тремя сотрудниками вуза, авторские индексы цитирования которых равны соответственно трем, восьми и пяти, опубликованы четыре научных и учебно-методических труда, причем первые три из них — в соавторстве. Пусть также на первое и второе издания базы значимых ссылок труды данных авторов ссылаются по три раза, а на третью — два раза (см. рисунок на третьей стороне обложки).

Согласно предлагаемой методике значение локального взвешенного индекса цитирования для каждого издания базы должно быть равно сумме средних значений авторских индексов цитирования для всех опубликованных тремя авторами трудов, ссылающихся на данное издание:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_1 &= \left(\frac{3+5}{2} \right) + \left(\frac{8+3}{2} \right) + 5 = 14,5; \\ \tilde{I}_2 &= \left(\frac{3+5}{2} \right) + \left(\frac{8+3}{2} \right) + \left(\frac{3+8+5}{3} \right) = 14,8; \\ \tilde{I}_3 &= \left(\frac{8+3}{2} \right) + 5 = 10,5. \end{aligned}$$

В случае, если издательства предлагают к приобретению книги с одинаковой стоимостью, которая совпадает с суммой денежных средств, выделенных на покупку литературы, сотруднику отдела комплектования приходится делать выбор, который может быть осуществлен с помощью общих взвешенных рейтингов каждого из предложенных изданий. Данные рейтинги для каждой новой книги вычисляются как сумма локальных взвешенных индексов цитирования изданий из базы значимых ссылок, на которые ссылается каждая новая

книга. Таким образом, значения общих взвешенных рейтингов новых книг, показанных на рисунке, составят:

$$\tilde{R}_1 = \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = [15, 4 + 14, 8] = 29;$$

$$\tilde{R}_2 = \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 + \tilde{I}_3 = [14, 5 + 14, 8 + 10, 5] = 40;$$

$$\tilde{R}_3 = \tilde{I}_3 = [10, 5] = 11.$$

По итогам сравнения полученных значений следует сделать выбор в пользу второй новой книги, поскольку уровень потребности в ней для учебной работы и научных исследований вуза выше.

Заключение

Полученные результаты могут быть использованы для реинжиниринга автоматизированной системы формирования оптимального заказа учебных и научных изданий, разработанной в целях поддержки принятия решений при комплектовании книжного фонда вуза. Ранжирование выбираемых на заказ изданий по уровню их значимости для вуза, осуществляемое данной системой в ходе оптимизации формируемого заказа, предлагается усовершенствовать на основе вводимого принципа ссылочной неравноценности, согласно которому рейтинг каждого издания вычисляется с учетом различных значений авторских показателей цитирования для всех трудов вуза, ссылающихся на источники приведенного в издании списка литературы. Данный принцип реализуется через введение понятия информационного веса литературной ссылки, который равен среднему арифметическому ненулевых индексов Хирша авторов ссылающегося труда из вуза и служит в качестве элементной базы для реконструкции математической модели заказа, также рассматриваемой в настоящей статье. На основе указанной модели может быть создан комплекс алгоритмов формирования оптимального заказа, разработаны другие виды обеспечения модернизируемой системы, что позволит точнее определять и полнее удовлетворять информационные потребности вуза, достигая увеличения номенклатуры и числа заказываемых изданий в рамках выделенных средств, а также существенного сокращения издержек на экспертизу выбираемых книг и обработку ее данных.

Список литературы

1. Пуха Г. П., Попов П. В., Драчев Р. В. Построение систем интеллектуальной поддержки принятия решений // Морской сборник. 2014. Т. 2012, № 11. С. 41–47.
2. Абильдина А. Д., Амиров А. Ж., Баймульдин М. К. Концепция автоматизации управления в отраслях образования: проблемы, особенности // Молодой ученый. 2016. № 10. С. 29–31.
3. Миронов В. В., Кромина Л. А., Ярцев Р. А. Применение общих рейтингов заказываемых изданий при формировании оптимального варианта заказа литературы для вуза // Вестник НГУ: науч. журн. Новосиб. гос. ун-та. 2012. Т. 10, Вып. 4. С. 5–12.
4. Головкин Ю. Б., Кромина Л. А., Ярцев Р. А. Автоматизация заказа литературы для вуза по показателям содержательной значимости изданий вуза // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 2. С. 125–132.
5. Кромина Л. А., Ярцев Р. А. Разработка системы заказа литературы для вуза на основе показателей содержательной значимости и подтверждение эффективности ее применения // Вестник СибГУТИ. 2018. № 2. С. 22–31.
6. Кромина Л. А., Ярцев Р. А. Об использовании рейтингов изданий при заказе литературы для вуза // Информатизация образования и науки. 2018. № 4(40). С. 177–185.
7. Кромина Л. А., Ярцев Р. А. Формирование заказа литературы для библиотеки вуза на основе локальных рейтингов изданий как задача исследования операций // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. 2010. Т. 14, № 5 (40). С. 176–187.
8. Беляева Л. Н., Шубина Н. Л. Научная статья как объект экспертной оценки // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. 2014. Вып. 172. С. 5–12.
9. Данелян Т. Я. Формальные методы экспертных оценок // Статистика и экономика. 2015. Вып. 1. С. 183–187.
10. Дорохова Ю. В., Гончарук Н. С. Использование метода экспертных оценок при прогнозировании социальных процессов // Среднерусский вестник общественных наук. 2013. Вып. 1. С. 34–44.
11. Сливкина Ю. А., Часовских В. П., Воронов М. П. Применение экспертных методов в управлении качеством // Научное обозрение. Экономические науки. 2016. № 4. С. 54–63.
12. Осипов А. Н., Эттингер А. П. Индекс Хирша: определение, расчет, использование // Вестник Российского государственного медицинского университета. 2013. Вып. 1. С. 75–77.
13. Полянин А. Д. Недостатки индексов цитируемости и Хирша и использование других наукометрических показателей // Мат. моделир. и числ. методы. 2014. № 1. С. 131–144.
14. Тарасевич Ю. Ю., Шиняева Т. С. Временная динамика индекса Хирша // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование. 2016. Т. 9, Вып. 1. С. 32–45.
15. Цыганов А. В. Краткое описание наукометрических показателей, основанных на цитируемости // Управление большими системами. 2013. Вып. 44. С. 248–261.
16. Штовба С. Д., Штовба Е. В. Обзор наукометрических показателей для оценки публикационной деятельности ученого // Управление большими системами. 2013. Вып. 44. С. 262–278.

L. A. Kromina, Candidate of Technical Sciences, e-mail: luyda-kr@yandex.ru,
Ufa State Aviation Technical University,
R. A. Yartsev, Doctor of Philosophy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: rust-66@yandex.com

On the Account of the Author's Significance Of Literary References by Optimization of the Order of Book Editions for the University Library

In order to modernize the method of ordering book publications, which is based on their ranking by the number of references to sources previously used by the authors of the university, it is proposed to assign a weight to each university link calculated by the author's citation indexes of the referencing work that allows to define more precisely and to satisfy more information needs of the university.

Keywords: university, library, edition, order, optimization, literary reference, information weight, author's index, base of significant links, weighted citation index, weighted edition rating

DOI: 10.17587/it.25.373-380

References

1. Puha G. P., Popov P. V., Drachev R. V. *Morskoj Sbornik*, 2014, vol. 2012, no. 11, pp. 41–47 (in Russian).
2. Abil'dina A. D., Amirov A. Zh., Bajmul'din M. K. *Molodoy Uchenyj*, 2016, no. 10, pp. 29–31 (in Russian).
3. Mironov V. V., Kromina L. A., Yarcev R. A. *Vestnik NGU: nauchn. zhurn. Novosib. gos. un-ta*, 2012, no. 10, iss. 4, pp. 5–12 (in Russian).
4. Golovkin Yu. B., Kromina L. A., Yarcev R. A. *Izv. Vuzov Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 125–132 (in Russian).
5. Kromina L. A., Yarcev R. A. *Vestnik SibGUTI*, 2018, no. 2, pp. 22–31 (in Russian).
6. Kromina L. A., Yarcev R. A. *Informatizaciya Obrazovaniya i Nauki*, 2018, no. 4(40), pp. 177–185 (in Russian).
7. Kromina L. A., Yarcev R. A. *Vestnik UGATU: nauchn. zhurn. Ufimsk. gos. aviak. tekhn. un-ta*, 2010, no. 14, no. 5 (40), pp. 176–187 (in Russian).
8. Belyaeva L. N., Shubina N. L. *Izvestiya Rossijskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A. I. Gercena*, 2014, iss. 172, pp. 5–12 (in Russian).
9. Danelyan T. Ya. *Statistika i Ehkonomika*, 2015, iss. 1, pp. 183–187 (in Russian).
10. Dorohova Yu. V., Goncharuk N. S. *Srednerusskij Vestnik Obshchestvennyh Nauk*, 2013, iss. 1, pp. 34–44 (in Russian).
11. Slivkina Yu. A., Chasovskih V. P., Voronov M. P. *Nauchnoe Obozrenie. Ehkonomicheskie Nauki*, 2016, no. 4, pp. 54–63 (in Russian).
12. Osipov A. N., Ehttinger A. P. *Vestnik Rossijskogo Gosudarstvennogo Medicinskogo Universiteta*, 2013, iss. 1, pp. 75–77 (in Russian).
13. Polyinin A. D. *Mat. modelir. i chisl. Metody*, 2014, no. 1, pp. 131–144 (in Russian).
14. Tarasevich Yu. Yu., Shinyaeva T. S. *Vestn. YUUrGU. Ser. Matem. modelirovanie i programirovanie*, 2016, vol. 9, iss. 1, pp. 32–45 (in Russian).
15. Cyganov A. V. *Upravlenie Bol'shimi Sistemami*, 2013, iss. 44, pp. 248–261 (in Russian).
16. Shtovba S. D., Shtovba E. V. *Upravlenie Bol'shimi Sistemami*, 2013, iss. 44, pp. 262–278 (in Russian).

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ

Журнал "Информационные технологии" входит в **ПЕРЕЧЕНЬ** рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденный ВАК, по **следующим научным специальностям**:

- 05.11.16 — Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям) (технические науки),
- 05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки),
- 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (физико-математические науки),
- 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки),
- 05.13.05 — Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки),
- 05.13.06 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки),
- 05.13.10 — Управление в социальных и экономических системах (технические науки),
- 05.13.11 — Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки),
- 05.13.12 — Системы автоматизации проектирования (по отраслям) (технические науки),
- 05.13.15 — Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети
- 05.13.17 — Теоретические основы информатики (технические науки),
- 05.13.17 — Теоретические основы информатики (физико-математические науки),
- 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки),
- 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки),
- 05.13.19 — Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

Ю. В. Полищук, канд. техн. наук, доц., e-mail:youra_polishuk@bk.ru,
Оренбургский государственный университет

Взаимосвязь ценности и старения информации при управлении большими техническими системами*

Предложена модель взаимосвязи ценности и старения информации больших технических систем, которая основана на оценке снижения значения информационной энтропии в результате ее обработки. Представленная модель может применяться при формировании инженерных методик оценивания качества и эффективности функционирования систем информационного обеспечения поддержки принятия решений для больших технических систем.

Ключевые слова: информация, ценность информации, старение информации, обработка информации, управление большими техническими системами

Введение

Рост объема количества информации, необходимого для принятия управленческих решений, диктует необходимость учета влияния информации на эффективность данного процесса.

Известны различные подходы к учету взаимосвязи ценности и старения информации [1–3]. Наибольшее распространение получил подход, предложенный в работе [1], когда старение информации определяется через изменение ценности информации во времени.

В данном подходе взаимосвязь ценности и старения информации определена, но эти понятия не рассматриваются самостоятельно, что фактически нейтрализует их взаимосвязь.

Следующий подход базируется на том факте, что ценность и старение информации являются самостоятельными относительно друг друга характеристиками [2], т.е. противоречит первому, рассмотренному в работе [1], подходу. Стоит отметить, что данный подход не устанавливает связь между ценностью информации, определенной целью ее получения, и ее старением, определенным как отклонение уровня материального явления от своего первоначального базиса.

Третий подход к учету взаимосвязи ценности и старения информации формулируется на

основе следующих определений [3]. Ценность информации определяется в связи с целью, для которой она была получена, с учетом времени ее существования. Данный подход допускает нулевую ценность информации, обусловленную ее длительным неиспользованием, т.е. устареванием. Последнее не является актуальным в контексте управления большими техническими системами (БТС). Как отмечал в своих работах Б. Н. Петров: "энтропия характеризует неопределенность управления, т.е. его качество" [4], но даже устаревшая информация о БТС приносит минимальный вклад в снижение информационной энтропии, а это противоречит определениям третьего подхода.

Постановка задачи

Синтез управленческих решений для БТС реализует группа лиц, принимающих решения, (ГЛПР) на основе анализа информации о БТС. Присутствие ГЛПР в процессах управления БТС продиктовано ее масштабом, а также сложностью процесса управления. Последнее, в свою очередь, приводит к необходимости обработки большого количества информации, характеризующей состояние БТС, которая обладает различной ценностью для ГЛПР с позиции ее вклада в минимизацию информационной энтропии БТС.

Информация, характеризующая состояние БТС, поступает в виде импульсных информационных потоков (ИП). Информационные импульсы поступают через фиксированный интервал времени (шаг импульса ИП), который может

* Исследования, проведенные в настоящей работе, соответствуют направлениям Федеральной целевой программы "Информационное общество" (2011–2020)", утвержденной постановлением Правительства РФ от 20.10.2010 г. № 1815-р, и критическим технологиям РФ (технологии информационных, управляющих и навигационных систем), утвержденным Президентом РФ (Пр-899 от 7.07.2011 г.).

быть скорректирован по требованию ГЛПР или в связи с изменениями оперативной обстановки на БТС, например, при ремонтах и авариях.

В ИП поступают две основные категории параметров: статические и динамические. Статические параметры не меняются с течением времени, а динамические характеризуются "устареванием", что обусловлено зависимостью от времени. ГЛПР формирует функцию "устаревания" для каждого динамического параметра на основе информации о времени его существования.

Для примера рассмотрим диаграмму информационной энтропии установившегося процесса эксплуатации условной БТС (рис. 1, см. третью сторону обложки) [5].

Информация о состоянии условной БТС поступает в виде нескольких ИП, число которых равно $N_{ИП}$. В первом и последнем ИП, которые изображены в верхней части рис. 1, поступает информация о состоянии БТС в виде динамических параметров, обладающих различными функциями "устаревания" и дискретностью импульсов.

Таким образом, ИП вносят различный вклад в минимизацию информационной энтропии БТС, которая изображена на нижней части рис. 1. Остальные ИП передают информацию о значении статических параметров БТС, не изменяющихся во времени, т.е. снижающих информационную энтропию БТС на постоянную величину. На рис. 1 отмечен допустимый пороговый уровень информационной энтропии для системы, определенный ГЛПР. В тех случаях, когда информационная энтропия системы имеет значение ниже допустимого уровня энтропии, ГЛПР обладает достаточными знаниями о системе для принятия корректных управленческих решений. В тех случаях, когда значение информационной энтропии системы выше допустимого уровня энтропии, для принятия корректных управляющих решений ГЛПР требуется дополнительная информация о состоянии БТС.

Информационная энтропия БТС $H_{инф}$ определяется как логарифм отношения всех известных параметров к их теоретическому числу с учетом коэффициентов весомости со знаком минус [6]:

$$H_{инф} = -\log_2 \left(\frac{F_{ст}(Pa_{ст}, K_{ст}) + F_{дин}(Pa_{дин}, F_{уст}, K_{дин})}{F_{ст}(GPa_{ст}(T_{эксп}), K_{ст}) + F_{дин}(GPa_{дин}(T_{эксп}), F_{уст}, K_{дин})} \right), \quad (1)$$

где $F_{ст}$, $F_{дин}$ — функции, вычисляющие суммы произведений мощностей множеств соответственно статических и динамических (с учетом функции "устаревания") параметров на весовые коэффициенты;

$Pa_{ст}$, $Pa_{дин}$ — множества известных соответственно статических и динамических (с учетом их существования) параметров системы;

$F_{уст}$ — функция устаревания БТС;

$K_{ст}$, $K_{дин}$ — множества весовых коэффициентов, соответствующих статическим и динамическим параметрам;

$GPa_{ст}$, $GPa_{дин}$ — функции, генерирующие множества теоретически возможных соответственно статических и динамических параметров системы за указанный период;

$T_{эксп}$ — время эксплуатации системы.

Таким образом, перспективным направлением исследований является разработка модели взаимосвязи ценности и старения информации БТС, которая реализуется как оценка снижения значения информационной энтропии БТС в результате ее обработки.

Практическая реализация

Рассмотрим в качестве примера БТС коллекторно-лучевую систему сбора (КСС) продукции газоконденсатного месторождения. Данная разновидность систем сбора продукции применяется на Оренбургском газоконденсатном месторождении (ОГКМ) [7]. КСС представляет собой кустовую систему трубопроводов, подключенную к блоку входных нитей установки комплексной подготовки газа.

К статическим параметрам данной БТС относятся все конструктивные параметры скважин и трубопроводов из состава КСС, например, внутренние диаметры труб и т.д. Стоит отметить, что с учетом длительного периода эксплуатации месторождения перечисленные параметры известны не в полном объеме.

К динамическим параметрам КСС относятся различные давления, такие как пластовые, забойные и устьевые давления скважин, значения всех дебитов.

Для учета изменений ценности значений динамических параметров используем функцию "устаревания" следующего вида:

$$F_{уст} = \exp(-\sqrt{T}), \quad (2)$$

где T — число календарных месяцев с момента получения значения динамического параметра.

Таким образом, если значение динамического параметра получено в текущем месяце ($T = 0$), то функция "устаревания" для него $F_{уст} = 1$. Учет снижения ценности для динамических параметров БТС реализован путем умножения значения веса параметра на значение функции "устаревания".

Функция "устаревания" сформулирована на основе экспоненциальной зависимости от времени их существования не случайно. Она выбрана по аналогии с кривыми падения основных эксплуатационных показателей ОГКМ.

С учетом зависимостей (1) и (2) для КСС, по которой не известны все параметры, информационная энтропия равна "стартовой". У КСС, по которой известны все параметры, информационная энтропия имеет нулевое значение. Значение "стартовой" энтропии зависит числа параметров описания БТС с учетом их весомости.

Весовые коэффициенты, сформированные с учетом их значимости при моделировании КСС и трудоемкости их получения, представлены в таблице.

Применяя формулу вычисления информационной энтропии БТС (1), можно проследить динамику изменения ценности параметров $CH(T)$ КСС от времени, используя зависимость вида

$$CH(T) = H_{инф}^{без_пар} - H_{инф}, \quad (3)$$

где $H_{инф}$ — текущее значение информационной энтропии БТС; $H_{инф}^{без_пар}$ — значение информационной энтропии БТС без учета параметра в момент времени T (число календарных месяцев с момента получения значения динамического параметра).

Используя зависимость (3), выполним оценку изменения ценности информации о значениях дебитов газа, конденсата, воды и устьевого давления скважины в составе КСС в течение 50 ка-

Весовые коэффициенты

Вид параметра	Параметр	Весовой коэффициент
Статистический	Все конструктивные параметры КСС (кроме рельефа)	30
	Рельеф трубопровода	20
Динамический	Дебиты газа, конденсата, воды и устьевого давления скважины	1
	Пластовое давление скважины	10
	Забойное давление скважины	3

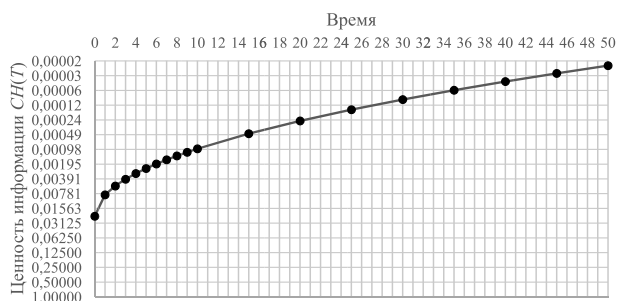


Рис. 2. Диаграмма изменения ценности $CH(T)$ параметра КСС

лендарных месяцев. Набор данных характеристик представлен одним параметром, так как информация об их значениях поступает к ГЛПР в виде единого документа. Результат оценки представлен на рис. 2.

Заключение

Предложенная в работе модель взаимосвязи ценности и старения информации БТС реализует возможность оценки динамики изменения ценности информации для ГЛПР путем оценки изменений значений информационной энтропии БТС с учетом этой информации. Данная модель может применяться при формировании инженерных методик оценивания качества и эффективности функционирования систем информационного обеспечения поддержки принятия решений для БТС. Последнее позволит повысить эффективность их управления и минимизировать расходы на их эксплуатацию.

Список литературы

1. Ефимов А. Н. Информация, ценность, старение, рассеяние. М.: Знание, 1978. 64 с.
2. Бакалов В. П. О мере ценности информации в адаптивных системах // Отбор и передача информации. 1977. Вып. 51. С. 103–108.
3. Виткин Л. М., Игнаткин В. У. Модель взаимосвязи ценности и старения информации // Системы обработки информации. 2007. Вып. 9. С. 141–143.
4. Петров Б. Н. Избранные труды. Т. 1. Теория автоматического управления. М.: Наука, 1983. 432 с.
5. Полищук Ю. В. Автоматизированный контроль информационной энтропии больших технических систем на основе сопутствующего эксплуатационного контента // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 7. С. 14–21.
6. Полищук Ю. В. Квалиметрическая идентификация больших и сложных технических систем по сопутствующему эксплуатационному контенту // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 6. С. 34–38.
7. Полищук Ю. В. Моделирование коллекторно-лучевой системы сбора продукции в условиях Оренбургского НГКМ // Нефтепромышленное дело. 2007. № 6. С. 60–63.

Relations between Significance and Aging of Information when Control Big Technical Systems

The growth of the amount of information necessary for making management decisions dictates the need to take into account its impact on the effectiveness of this process. The latter is especially relevant in cases of control of large technical systems, since the process of their operation is associated with the need to process a large amount of information characterizing its state. This information has a different value for a group of decision makers from the standpoint of its contribution to minimizing the information entropy of a large technical system. In the framework of this work, three approaches to the relationship of value and aging of information are considered. Their features and disadvantages are noted. The paper proposes a model of the relationship between the value and aging of information of large technical systems, which is based on an assessment of the reduction in the value of information entropy as a result of its processing. The presented model can be applied in the formation of engineering methods for assessing the quality and efficiency of the functioning of information support systems for decision support for large technical systems. As a practical example, the collector-beam system for collecting products from a gas-condensate field is considered. This kind of collection systems is used at the Orenburg gas condensate field. The collector-beam collection system is a cluster pipeline system connected to the input filament unit of the integrated gas preparation unit. Using the model of the relationship of the value and aging of information, an assessment was made of the value change of information about the gas, condensate, water flow rates and wellhead pressure in the collector-beam collection system for 50 calendar months. The model of the relationship between the value and aging of information of large technical systems realizes the possibility of assessing the dynamics of change in the value of information for a group of decision-makers by assessing changes in the values of information-entropy of a large technical system with this information. The latter will improve the efficiency of their management and minimize the cost of their operation.

Keywords: information, significance of information, aging of information, data processing, control big technical systems

DOI: 10.17587/it.25.381-384

References

1. **Efimov A. N.** Information, value, aging, scattering, Moscow, Znanie, 1978. 64 p.
2. **Bakalov V. P.** *Otbor i Peredacha Informacii*, 1977, iss. 51, pp. 103–108.
3. **Vitkin L. M., Ignatkin V. U.** *Sistemy Obrabotki Informacii*, 2007, iss. 9, pp. 141–143.
4. **Petrov B. N.** Selected Works. Vol. 1. Automatic control theory, Moscow, Nauka, 1983, 432 p.
5. **Polishhuk Ju. V.** *Vestnik Komp'yuternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2017, no. 7, pp. 14–21.
6. **Polishhuk Ju. V.** *Vestnik Komp'yuternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2014, no. 6, pp. 34–38.
7. **Polishhuk Ju. V.** *Neftepromyslovoe Delo*, 2007, no. 6, pp. 60–63.

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Н. В. Яшина*.

Сдано в набор 05.04.2019. Подписано в печать 23.05.2019. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ619. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

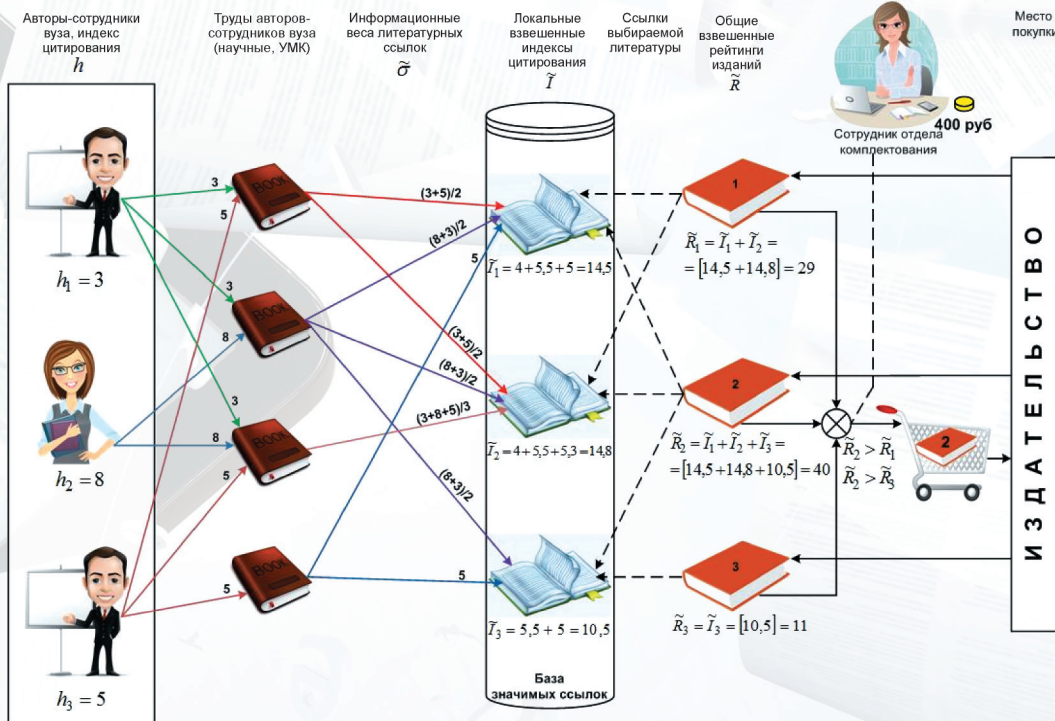
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунок к статье Л. А. Кроминой, Р. А. Ярцева

«ОБ УЧЕТЕ АВТОРСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ЛИТЕРАТУРНЫХ ССЫЛОК ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАКАЗА КНИЖНЫХ ИЗДАНИЙ ДЛЯ БИБЛИОТЕКИ ВУЗА»



Пример применения общих взвешенных рейтингов для закупки новых изданий

Рисунок к статье Ю. В. Полищука

«ВЗАИМОСВЯЗЬ ЦЕННОСТИ И СТАРЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ БОЛЬШИМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ»

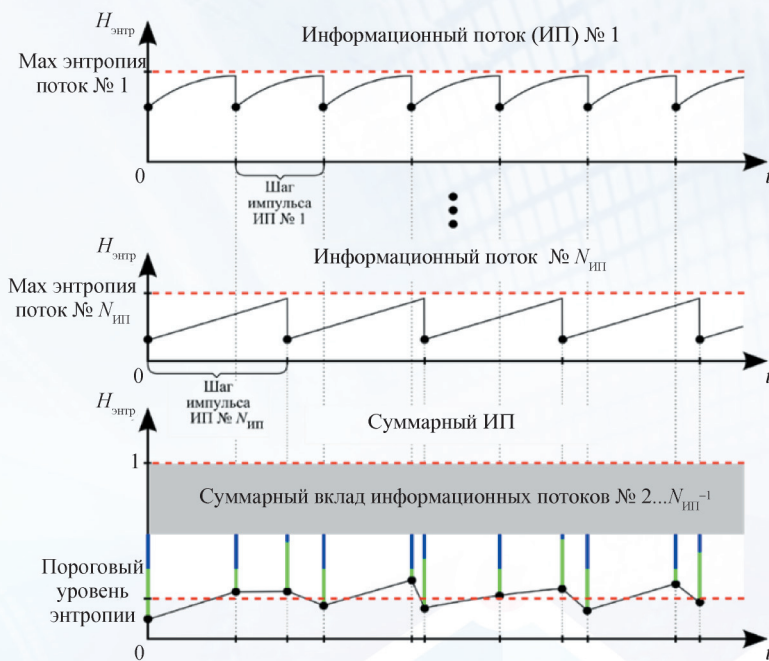


Рис. 1. Диаграмма информационной энтропии условной БТС

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу
«Пресса России» – 72656



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79963

Ежемесячный
междисциплинарный
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано микросистем в различные области науки, технологии и производства.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79493



Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79492

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 22765

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, Стромынский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru