

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

**Научный журнал Российской академии наук
(издается под руководством Отделения нанотехнологий
и информационных технологий РАН)**

Издается с 1989 года
Журнал выходит ежеквартально

Учредители:
Российская академия наук
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии наук

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

академик РАН И. А. Соколов — председатель Редакционного совета
академик РАН Г. И. Савин
академик РАН А. Л. Степковский
член-корреспондент РАН Ю. Б. Зубарев
профессор Ш. Долев (S. Dolev, Beer-Sheva, Israel)
профессор Ю. Кабанов (Yu. Kabanov, Besancon, France)
профессор М. Никулин (M. Nikulin, Bordeaux, France)
профессор В. Ротарь (V. Rotar, San-Diego, USA)
профессор М. Финкельштейн (M. Finkelstein, Rostok, Germany)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

академик РАН И. А. Соколов — главный редактор
профессор, д.ф.-м.н. С. Я. Шоргин — заместитель главного редактора
д.т.н. В. Н. Захаров проф., д.ф.-м.н. В. Ю. Королев
проф., д.т.н. В. Д. Ильин проф., д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков
проф., д.ф.-м.н. Л. А. Калиниченко проф., д.т.н. И. Н. Синицын
д.т.н. В. А. Козимиади к.т.н. А. В. Филин
проф., д.т.н. К. К. Колин к.ф.-м.н. С. А. Христочевский

Редакция

профессор, д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков
к.ф.-м.н. Е. Н. Арутюнов
С. Н. Стригина (ответственный секретарь)

© Федеральный исследовательский центр «Информатика
и управление» Российской академии наук, 2015

Журнал входит в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ):

http://elibrary.ru/title_about.asp?id=28980

Журнал включен в базу данных CrossRef (систему DOI — Digital Object Identifier),
в базу данных Ulrich's periodicals directory

и в информационную систему «Общероссийский математический портал Math-Net.Ru»

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

Журнал «Системы и средства информатики»
включен в формируемый Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

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

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 25 № 3 Год 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Применение ортогональных разложений для аналитического моделирования многомерных распределений в нелинейных стохастических системах на многообразиях

И. Н. Синицын **4**

Методы моментов в задачах аналитического моделирования распределений в нелинейных стохастических системах на многообразиях

И. Н. Синицын **24**

Метод нахождения стационарного распределения очереди в двухканальной системе с упорядоченным входом конечной емкости

**И. С. Зарядов, Л. А. Мейханаджян,
Т. А. Милованова, Р. В. Разумчик** **44**

Построение нейронных сетей глубокого обучения для классификации временных рядов

М. С. Попова, В. В. Стрижов **60**

Возможности построения безопасной архитектуры для динамически изменяющейся информационной системы

**А. А. Грушо, Н. А. Грушо, Е. Е. Тимонина,
С. Я. Шоргин** **78**

Проблемы взаимодействия вредоносного кода и программ защиты в архитектуре современных операционных систем

Р. Р. Гилязов, А. А. Грушо **94**

Географические стандарты для обеспечения геоинтероперабельности

С. К. Дулин, И. Н. Розенберг, В. И. Уманский **109**

Виртуальные гетерогенные коллективы, поддерживающие принятие решений

**И. А. Кириков, А. В. Колесников, С. В. Листопад,
С. Б. Румовская** **126**

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 25 № 3 Год 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Оценка эффективности способа управления доставкой сетевых пакетов на стороне получателя В. Н. Гридин, Е. О. Карпухин, И. А. Евдокимов	150
К вопросу оценки эффективности автоматизированных систем с использованием метода анализа иерархий А. А. Зацаринный, Ю. С. Ионенков	161
Некоторые подходы к формированию нормативно-технической базы в части требований к архитектурному построению информационных систем организаций — участников единого информационного пространства России А. А. Зацаринный, Э. В. Киселев	179
Некоторые подходы к интеграции аналитических данных существующих и перспективных систем поддержки принятия решений А. П. Сучков	195
Нормализованные деньги в системе имущественных статусов В. Д. Ильин	206
Нормативные и методологические аспекты организации информационного мониторинга национальной безопасности Г. В. Лукьянов, Д. А. Никишин, Г. Ф. Веревкин, В. В. Косарик	218
Система извлечения биографических фактов из текстов исторической направленности И. М. Адамович, О. И. Волков	235
Программный комплекс анализа байесовских моделей в теории массового обслуживания и надежности А. А. Кудрявцев	251
Об авторах	262
Правила подготовки рукописей статей	265
Requirements for manuscripts	269

**ПРИМЕНЕНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ
ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
МНОГОМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
В НЕЛИНЕЙНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
НА МНОГООБРАЗИЯХ***

И. Н. Синицын¹

Аннотация: Рассматриваются вопросы оценки точности и чувствительности алгоритмов параметрического на базе методов ортогональных разложений (МОР) и квазимоментов (МКМ) аналитического моделирования многомерных распределений в стохастических системах (СтС) на многообразиях (МСтС) с винеровскими и пуассоновскими шумами. Выведены уравнения точности и чувствительности алгоритмов аналитического моделирования согласно МОР для многомерных распределений. Особое внимание уделено МКМ для нормальных МСтС. Результаты положены в основу модуля разрабатываемого инструментального символьного программного обеспечения методов аналитического моделирования (МАМ) в среде MATLAB-MAPLE. Рассмотрены вопросы сокращения числа уравнений МОР и МКМ для многомерных распределений. В качестве иллюстративного примера изучена одномерная нелинейная МСтС с мультипликативным гауссовским (нормальным) белым шумом. Сформулированы возможные обобщения. Для типовых задач оценки надежности и безопасности технических систем предложены алгоритмы оценки точности и чувствительности для МАМ методом ортогональных разложений многомерных распределений.

Ключевые слова: метод аналитического моделирования (МАМ); метод квазимоментов (МКМ); метод ортогональных разложений (МОР); плотность одномерного многомерного распределения; полиномы Эрмита; стохастическая система на многообразиях (МСтС); уравнения точности МОР и МКМ; уравнения чувствительности МОР и МКМ

DOI: 10.14357/08696527150301

1 Введение

Как известно [1, 2], методы аналитического моделирования распределений процессов в СтС, описываемых дифференциальными стохастическими уравнениями Ито с винеровскими и пуассоновскими шумами, основанные на параметризации их распределений, получили широкое практическое применение в задачах

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-07-02244).

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

теории управления и информатики. Обобщение результатов [1, 2] на случай многоканальных круговых и сферических СтС выполнено в [3–13]. В [8] развиты дискретные методы параметрического статистического и аналитического моделирования в МСтС, рассмотрены приближенные методы статистического моделирования (МСМ) различной точности и МАМ, основанные на ортогональных разложениях. Подробно развита нелинейная корреляционная теория МСМ и МАМ. В [9–12] развиты методы и алгоритмы аналитического моделирования гауссовских (нормальных) процессов в МСтС. В [14] применительно к типовым задачам оценки надежности и безопасности технических систем [15–17] рассмотрены вопросы оценки точности и чувствительности параметрических алгоритмов МАМ одномерных распределений процессов по МОР и МКМ в нелинейных негауссовых дифференциальных МСтС.

Статья представляет собой развитие [14] на случай многомерных распределений. В разд. 2 приведены необходимые теоремы МОР для одномерных распределений. Изложение МОР и МКМ для многомерных распределений дается в разд. 3 и 4. В разд. 5 приводятся уравнения точности и чувствительности МОР и МКМ для многомерных распределений. В разд. 6 рассматривается пример, иллюстрирующий составление уравнений МОР и МКМ в одномерной нелинейной системе с мультипликативным гауссовским шумом.

2 Методы ортогональных разложений и квазимоментов для одномерных распределений

Как известно [1, 8], для нелинейных с мультипликативными шумами дифференциальных СтС в конечномерных пространствах, в том числе и МСтС, используется дифференциальное стохастическое уравнение Ито вида

$$dY_t = a(Y_t, \Theta, t) dt + b(Y_t, \Theta, t) dW_0 + \int_{R_0^q} c(Y_t, \Theta, t, v) dP^0(\Theta, t, dv). \quad (1)$$

Здесь Y_t — p -мерный вектор состояния, $Y_t \in \Delta^y$ (Δ^y — многообразие состояний); Θ — вектор случайных параметров размерности p^Θ ; $a = a(y_t, \Theta, t)$ и $b = b(y_t, \Theta, t)$ — известные $(p \times 1)$ -мерная и $(p \times r)$ -мерная функции вектора Y_t и времени t ; $W_0 = W_0(\Theta, t)$ — r -мерный винеровский стохастический процесс интенсивности $\nu_0 = \nu_0(\Theta, t)$; $c(y_t, \Theta, t, v)$ — $(p \times 1)$ -мерная функция y_t , t и вспомогательного $(q \times 1)$ -мерного параметра v ; $\int dP^0(\Theta, t, A)$ — центрированная пуассоновская мера:

$$\int_{\Delta} dP^0(\Theta, t, A) = \int_{\Delta} dP(\Theta, t, A) - \int_{\Delta} \nu_P(\Theta, t, A) dt,$$

где $\int_{\Delta} dP(\Theta, t, A)$ — число скачков пуассоновского процесса в интервале времени Δ ; $\nu_P(\Theta, t, A)$ — интенсивность пуассоновского процесса $P(t, A)$; A — некоторое борелевское множество пространства R_0^q с выколотым началом координат. Интеграл (1) в общем случае распространяется на все пространство R_0^q с выколотым началом координат. Начальное значение Y_0 вектора Y_t представляет собой случайную величину, не зависящую от приращений винеровского процесса $W_0(\Theta, t)$ и пуссоновского процесса $P(\Theta, t, A)$ на интервалах времени $\Delta = (t_1, t_2]$, следующих за t_0 , $t_0 \leq t_1 \leq t_2$, для любого множества A .

Как известно [1, 2], для вычисления вероятностей событий, связанных со случайными функциями, в прикладных задачах достаточно знания многомерных распределений. Поэтому центральной задачей прикладной теории МСтС является задача вероятностного анализа одно- и многомерных распределений процессов, удовлетворяющих дифференциальному стохастическому уравнению Ито (1) при соответствующих начальных условиях. В теории МСтС различают два принципиально разных подхода к вычислению распределений. Первый общий подход основан на статистическом моделировании, т. е. на прямом численном решении (1) с последующей статистической обработкой результатов. Второй общий подход основан на теории непрерывных марковских процессов и предполагает аналитическое моделирование, т. е. решение детерминированных уравнений в функциональных пространствах (уравнений Фоккера–Планка–Колмогорова, Феллера–Колмогорова, Пугачёва и др.) для одно- и многомерных распределений. В практических задачах часто используют и комбинированные методы. При этом будем предполагать, что существуют одно- и многомерные плотности процессов в МСтС (1). Достаточные условия их существования можно найти, например, в [18].

В настоящем разделе будем полагать, что, во-первых, одномерные плотности распределений существуют и, во-вторых, их плотности можно параметризовать с помощью условных параметров $\vartheta^y = \vartheta^y(\Theta, t)$: вероятностных моментов, квазимоментов, семиинвариантов, коэффициентов ортогонального разложения плотностей и др. [1, 2].

Далее будем пользоваться известной обобщенной формулой Ито [1, 2, 14] для дифференциала нелинейной функции $\varphi(Y_t, \Theta, t)$:

$$\begin{aligned} d\varphi(Y_t, \Theta, t) = & \left\{ \varphi_t(Y_t, \Theta, t) + \varphi_Y(Y_t, \Theta, t)^T a(Y_t, \Theta, t) + \right. \\ & + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left[\varphi_{YY}(Y_t, \Theta, t) b(Y_t, \Theta, t) \nu_0(\Theta, t) b(Y_t, \Theta, t)^T \right] + \\ & + \int_{R_0^q} \left[\varphi(Y_t + c(Y_t, \Theta, t, v), \Theta, t) - \varphi(Y_t, \Theta, t) - \varphi(Y_t, \Theta, t)^T c(Y_t, \Theta, t, v) - \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left[c(Y_t, \Theta, t, v) b(Y_t, \Theta, t) \nu_0(\Theta, t) b(Y_t, \Theta, t)^T c(Y_t, \Theta, t, v)^T \right] \right] dv \right\} dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\varphi(Y_t, \Theta, t) - \varphi_Y(Y_t, \Theta, t)^T c(Y_t, \Theta, t, v) \Big] \nu_P(\Theta, t, v) dv \Big\} dt + \\
 & + \varphi_Y(Y_t, \Theta, t)^T b(Y_t, \Theta, t) dW_0(\Theta, t) + \\
 & + \int_{R_0^q} [\varphi(Y_t + c(Y_t, \Theta, t, v), \Theta, t) - \varphi(Y_t, \Theta, t)] dP^0(\Theta, t, dv). \quad (2)
 \end{aligned}$$

Следуя [2, 14], представим уравнения МОР в виде следующего отрезка разложения:

$$f = f(y_t, \Theta, \vartheta^y, t) \approx w(y_t, \Theta) \left[1 + \sum_{l=3}^{n_1} \sum_{|\nu|=l} c_{\nu t}(\Theta, t) p_{\nu}(y_t) \right]. \quad (3)$$

Здесь $w = w(y_t; \Theta)$ — эталонная одномерная плотность, выбираемая из условия совпадения первых двух вероятностных моментов для w и f ; $\{p_{\nu}(y_t), q_{\nu}(y_t)\}$ — система биортонормальных полиномов с весом w , т. е. удовлетворяющих условию

$$\mathbf{M}_{\Delta^y}^w [p_{\nu}(Y_t) q_{\mu}(Y_t)] = \delta_{\nu\mu} = \begin{cases} 0 & \text{при } \mu \neq \nu; \\ 1 & \text{при } \mu = \nu, \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{M}_{\Delta^y}^w$ — символ математического ожидания в области Δ^y ; $\vartheta^y = \{m_t, K_t, c_{\nu t}\}$ — условные параметры МОР, т. е. вектор условного математического ожидания $m_t = m(\Theta, t)$, условная ковариационная матрица $K_t = K(\Theta, t)$ и условная матрица коэффициентов ортогонального разложения $c_{\nu t} = c_{\nu t}(\Theta, t)$, удовлетворяющая условию

$$c_{\nu t} = \mathbf{M}_{\Delta^y}^f [q_{\nu}(Y_t)] = q_{\nu}(\alpha), \quad (5)$$

где $q_{\nu}(\alpha)$ представляет собой комбинацию условных начальных моментов α_t вектора Y_t , полученную из $q_{\nu}(x)$ заменой всех одночленов $x_1^{k_1}, \dots, x_r^{k_r}$ соответствующими моментами $\alpha_{k_1}, \dots, \alpha_{k_r}$.

Будем пользоваться векторной нумерацией полиномов $\{p_{\nu}, q_{\nu}\}$ так, чтобы сумма координат $|\nu| = \nu_1 + \dots + \nu_r$ векторного индекса $\nu = [\nu_1 \dots \nu_r]^T$ была равна степени полиномов. Тогда число линейно независимых полиномов данной степени $\nu_* = |\nu|$ будет равно числу независимых одночленов степени ν_* , т. е. $C_{r+\nu_*-1}^{\nu_*}$. Отметим также, что согласно [1, 2] существование всех моментов для плотности необходимо и достаточно для существования интегралов (4).

В [14] доказано следующее утверждение.

Теорема 1. *Если существует одномерное распределение процесса Y_t в MCmC (1), то при фиксированном векторе параметров Θ и полиномиальных $\{p_{\nu}(y_t), q_{\nu}(y_t)\}$ в основе МОР для одномерного распределения лежат разложения (3) и уравнения*

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{m}_t &= A^m(m_t, K_t, c_{\nu t}, \Theta, t) = \varphi_{10}(m_t, K_t, \Theta, t) + \\
 &\quad + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \varphi_{1\nu}(m_t, K_t, \Theta, t) c_{\nu t}, \quad m(t_0) = m_0; \\
 \dot{K}_t &= A^K(m_t, K_t, c_{\nu t}, \Theta, t) = \varphi_{20}(m_t, K_t, \Theta, t) + \\
 &\quad + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \varphi_{2\nu}(m_t, K_t, \Theta, t) c_{\nu t}, \quad K(t_0) = K_0; \\
 \dot{c}_{\kappa t} &= A^{c_\kappa}(m_t, K_t, c_{\kappa t}, \Theta, t) = \varphi_{\kappa 0}(m_t, K_t, \Theta, t) + \\
 &\quad + \psi_{\kappa 0}^{m_t}(m_t, K_t, \Theta, t)^T \dot{m}_t + \\
 &\quad + \frac{1}{2_n} \text{tr} [\psi_{\kappa 0}^{K_t}(m_t, K_t, \Theta, t) \dot{K}_t] + \frac{1}{2} \text{tr} [\psi_{\kappa \nu}^{K_t}(m_t, K_t, \Theta, t) \dot{K}_t] + \\
 &\quad + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} c_{\nu t} [\varphi_{\kappa \nu}(m_t, K_t, \Theta, t) + \psi_{\kappa \nu}^{m_t}(m_t, K_t, \Theta, t)^T \dot{m}_t], \\
 &\quad c_{\kappa}(t_0) = c_{\kappa 0}.
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 \varphi_{10}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^w [a(Y_t, \Theta, t)]; \\
 \varphi_{1\nu}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^{wp\nu} [a(Y_t, \Theta, t)]; \\
 \varphi_{20}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^w \left[a(Y_t, \Theta, t) (Y_t - m_y)^T + \right. \\
 &\quad \left. + (Y_t - m_t) a(Y_t, \Theta, t)^T + \bar{\sigma}(Y_t, \Theta, t) \right]; \\
 \varphi_{2\nu}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^{wp\nu} \left[a(Y_t, \Theta, t) (Y_t - m_t)^T + \right. \\
 &\quad \left. + (Y_t - m_t) a(Y_t, \Theta, t)^T + \bar{\sigma}(Y_t, \Theta, t) \right]; \\
 \bar{\sigma}(Y_t, \Theta, t) &= \sigma(Y_t, \Theta, t) + \int_{R_0^q} c(Y_t, \Theta, t, v) c(Y_t, \Theta, t, v)^T \nu_P(t, \Theta) dv; \\
 \sigma(Y_t, \Theta, t) &= b(Y_t, \Theta, t) \nu_0(\Theta, t) b(Y_t, \Theta, t)^T; \\
 \varphi_{\kappa \nu}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^{wp\nu} \left\{ \frac{\partial^T q_\kappa(Y_t)}{\partial Y_t} a(Y_t, \Theta, t) + \right. \\
 &\quad + \frac{1}{2} \text{tr} \left[\frac{\partial}{\partial Y_t} \frac{\partial^T}{\partial Y_t} q_\kappa(Y_t) \sigma(Y_t, \Theta, t) \right] + \int_{R_0^q} \left[q_\kappa(Y_t + c(Y_t, \Theta, t, v)) - q_\kappa(Y_t) - \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{\partial q_\kappa(Y_t)}{\partial Y_t} c(Y_t, \Theta, t, v) \right] \nu_P(\Theta, t, dv) \right\}; \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\kappa\nu}^{m_t}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta^y}^{wp_\nu}[q_\kappa^{m_t}(Y_t)] ; \\ \psi_{\kappa\nu}^{K_t}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta^y}^{wp_\nu}[q_\kappa^{K_t}(Y_t)] , \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

а интегралы $\psi_{\kappa 0}^{m_t}(m_t, K_t, \Theta, t)$ и $\psi_{\kappa 0}^{K_t}(m_t, K_t, \Theta, t)$ выражаются согласно (8) при $p_\nu(y_t) = p_0(y_t) = 1$. При этом предполагается, что выполнены условия (4) и (5), а интегралы (7) и (8) конечны.

Уравнения теоремы 1 для \dot{m}_t и \dot{K}_t линейны относительно c_{kt} , в то время как уравнения для \dot{c}_{kt} в силу (6) нелинейны.

Наконец, отметим, что для рассмотрения стационарных распределений с параметрами $\vartheta^{*y} = \{m^*; K^*; c_\nu^*\}$ достаточно правые части уравнений (6) приравнять нулю:

$$\begin{aligned} A^m(m^*, K^*, c_\nu^*, \Theta, t) &= 0; \quad A^K(m^*, K^*, c_\nu^*, \Theta, t) = 0; \\ A^{c_\kappa}(m^*, K^*, c_\kappa^*, \Theta, t) &= 0. \end{aligned}$$

При аппроксимации одномерной плотности f отрезком разложения по многомерным полиномам Эрмита $\{H_\nu, G_\nu\}$ имеем согласно [1, 2]

$$p_\nu(y_t) = \frac{H_\nu(y_t - m_t)}{\nu_1! \dots \nu_p!}; \quad q_\nu(y_t) = G_\nu(y_t - m_t); \quad (9)$$

$$c_{\nu t} = q_\nu(\alpha) = G_\nu(\mu); \quad (10)$$

$$q_\kappa^{m_t} = 0; \quad q_\kappa^{K_t}(\alpha) = 0 \quad (|\kappa| = 3); \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} q_{\kappa r}^{m_t} &= -\kappa_r c_{\kappa-e_r, t} \quad (r = \overline{1, p}; |\kappa| = 4, \dots, N); \\ q_{\kappa rr} &= -\kappa_r \kappa_s c_{\kappa-e_r-e_s, t} \quad (r, s = \overline{1, p}; \quad s > r; \quad |\kappa| = 5, \dots, N). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Таким образом, в основе МКМ для МСтС (1) лежат уравнения теоремы 1 при условиях (9)–(12) (**теорема 2**).

В практических задачах надежности и безопасности технических систем [15–17] для оценки точности МОР и МКМ можно, следуя [1, 2], применить метод сравнения вероятностей попадания на множество определенного класса или метод оценки моментов четвертого порядка.

Как известно [19, 20], методы теории чувствительности в инженерной практике широко применяются для приближенного анализа точности СтС со случайными параметрами Θ в предположении малых дисперсий этих параметров по сравнению с их математическими ожиданиями. Используя теоремы 1 и 2, найдем условные параметры $\vartheta^y = \{m_t; K_t; c_{\nu t}\}$ одномерной плотности. Уравнения функций чувствительности первого порядка условных параметров ϑ^y для МОР получаются путем дифференцирования правых и левых частей уравнений теоремы 1 по Θ . В этом случае получаются следующие уравнения для функций

чувствительности первого порядка $\nabla^\Theta m_t = (\partial/\partial\Theta) m_t$, $\nabla^\Theta K_t = (\partial/\partial\Theta) K_t$ и $\nabla^\Theta c_{\nu t} = (\partial/\partial\Theta) c_{\nu t}$:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^\Theta \dot{m}_t &= \nabla^\Theta \varphi_{10} + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \left(\nabla^\Theta \varphi_{1\nu} m_t^{c_\nu} + \varphi_{1\nu} \nabla^\Theta c_{\nu t} \right), \quad \nabla^\Theta m(t_0) = 0; \\ \nabla^\Theta \dot{K}_t &= \nabla^\Theta \varphi_{20} + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \left(\nabla^\Theta \varphi_{2\nu} + \varphi_{2\nu} \nabla^\Theta c \right)_{\nu t}, \quad \nabla^\Theta K(t_0) = 0, \\ \nabla^\Theta \dot{c}_{\kappa t} &= \nabla^\Theta \varphi_{\kappa 0} + \nabla^\Theta \left\{ \psi_{\kappa 0}^{m_t} \dot{m}_t + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left(\psi_{\kappa 0}^{m_t} \dot{K}_t \right) + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left(\psi_{\kappa\nu}^{K_t} \dot{K}_t \right) \right\} + \\ &\quad + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \left\{ \nabla^\Theta c_{\nu t} [\varphi_{\kappa\nu} + (\psi_{\kappa\nu}^{m_t})^T \dot{m}_t] + c_{\nu t} \nabla^\Theta [\varphi_{\kappa\nu}^{m_t}]^T \dot{m}_t \right\}, \\ &\quad \nabla^\Theta c_\kappa(t_0) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Заметим, что при дифференцировании ϑ^y по Θ порядок уравнений возрастает пропорционально числу производных.

Аналогично записываются уравнения для функций чувствительности второго порядка $\nabla^\Theta(\nabla^\Theta)^T m_t$, $\nabla^\Theta(\nabla^\Theta)^T K_t$ и $\nabla^\Theta(\nabla^\Theta)^T c_{\nu t}$.

Таким образом, в условиях теоремы 1 уравнения алгоритма чувствительности МОР имеют вид (13) (**теорема 3**), а в условиях теоремы 2 уравнения алгоритма чувствительности МКМ имеют вид (13) при условиях (9)–(12) (**теорема 4**).

Основной вычислительной трудностью практического применения МОР для многомерных дифференциальных МСтС является быстрый рост числа уравнений для $c_{\nu t}$ с увеличением размерности p вектора состояния Y_t . В [1, 2] содержатся таблицы, отражающие эти закономерности. В частности, для МСтС размерности $p = 10$, порядка учитываемого вероятностного момента $N = 4$ и отрезка разложения одномерной плотности $n_1 = n = 4$ количество уравнений составляет $Q^{\text{MOP}} = 85$. Описанные в [1, 2] универсальные методы сокращения числа уравнений МОР, основанные на использовании метода С. В. Мальчикова и его обобщений, моментно-семиинвариантных соотношений, соответствующего ряда Эджуорта, а также их комбинации могут быть использованы для МСтС (1). В тех случаях, когда известна аналитическая природа нелинейной задачи, применяют метод нормальных координат совместно с обобщающей формулой Ито или непосредственно в уравнениях МСтС (1), или в уравнениях (6).

3 Метод ортогональных разложений для многомерных распределений

Применим обобщенную формулу Ито (2) к параметрам ϑ_n^y следующего конечного отрезка согласованных ортогональных разложений многомерных плотностей:

$$f_n = f_n(y_1, \dots, y_n; \Theta, \vartheta_n^y, t_1, \dots, t_n) \approx w_n(y_1, \dots, y_n; \Theta, t_n) \times \\ \times \left[1 + \sum_{l=3}^{n_n} \sum_{|\nu_1|+\dots+|\nu_n|=l} c_{\nu_1, \dots, \nu_n} p_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1, \dots, y_n) \right].$$

Здесь, в отличие от разд. 2, положим $Y(t_i) = Y_i$ ($i = \overline{1, p}$); $w_n = \{w_n(y_1, \dots, y_n; \Theta, t_n)\}$ — согласованные последовательности плотностей, имеющие те же вероятностные моменты первого и второго порядка, что и f_n , вследствие чего каждая из плотностей w_n зависит как от параметров, так и от значений условного математического ожидания $m(\Theta, t) = M_{\Delta^y}^{f_n} Y_t$ и условной ковариационной функции $K(\Theta, t, t') = M_{\Delta^y}^{f_n} [Y^0(\Theta, t) Y^0(\Theta, t')^T]$ при $t, t' = t_1, \dots, t_n$ ($n = 1, 2, \dots$). Количество

$$c_{\nu_1, \dots, \nu_n}(\Theta, t_1, \dots, t_n) = M_{\Delta^y}^{f_n} [q_{\nu_1, \dots, \nu_n}(Y_1, \dots, Y_n)] \quad (14)$$

представляют собой коэффициенты МОР для многомерного распределения; $\{p_{\nu_1, \dots, \nu_n}(Y_1, \dots, Y_n), q_{\nu_1, \dots, \nu_n}(Y_1, \dots, Y_n)\}$ — многомерные биортонормальные полиномы, удовлетворяющие условиям согласованности [1, 2]:

$$c_{\nu_1, \dots, \nu_{n-1}, 0}(\Theta, t_1, \dots, t_n) = c_{\nu_1, \dots, \nu_{n-1}}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}). \quad (15)$$

В результате придем к следующим обыкновенным дифференциальным уравнениям для параметров условного многомерного распределения $\vartheta_n^y = \{\bar{m}_n; \bar{K}_n; c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}\}$:

$$\dot{m}_n = A^{m_n}(m_n(\Theta, t_n), K_n(\Theta, t_n), c_{\nu_n}(\Theta, t_n)) = \varphi_{10}(m_n, K_n, \Theta, t_n) + \\ + \sum_{l=1}^{n_1} \sum_{|\nu|=l} \varphi_{1\nu}(m_n, K_n, \Theta, t_n) c_{\nu_n}; \quad (16)$$

$$\dot{K}_n = A^{K_n}(m_n(\Theta, t_n), K_n(\Theta, t_n), c_{\nu_n}(\Theta, t_n)) = \varphi_{20}(m_n, K_n, \Theta, t_n) + \\ + \sum_{l=1}^{n_1} \sum_{|\nu|=l} \varphi_{2\nu}(m_n, K_n, \Theta, t_n) c_{\nu_n}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} = A^{K_2}(m_2(\Theta, t_2), K_2(\Theta, t_2), c_{\nu_1, \nu_2}(\Theta, t_2)) = \varphi_{30}(\bar{m}_2, \bar{K}_2, \Theta, t_2) + \\ + \sum_{l=3}^{n_2} \sum_{|\nu_1|+|\nu_2|=l} c_{\nu_1, \nu_2} \varphi_{3\nu_1 \nu_2}(\bar{m}_2, \bar{K}_2, \Theta, t_2); \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(\Theta, t_1, \dots, t_n)}{\partial t_n} = \\
 & = A^{c_\kappa} \left(m_n, \dot{m}_n, \bar{m}_n, K_n, \dot{K}_n, \bar{K}_n, \dot{K}_h, K_{nh}, \Theta, t_1, \dots, t_n \right) = \\
 & = \varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) + \psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}^{m_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \dot{m}(t_n) + \\
 & \quad + \text{tr} \left[\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}^{K_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \dot{K}(t_n) \right] + \\
 & \quad + \sum_{h=1}^{n_n-1} \text{tr} \left[\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{K_h} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \frac{\partial K(t_n, t_h)}{\partial t_n} \right] + \\
 & \quad + \sum_{l=3} \sum_{|\nu_1|+ \dots + |\nu_n|=l} c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0} \left\{ \varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) + \right. \\
 & \quad \quad + \psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{m_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \dot{m}(t_n) + \\
 & \quad \quad + \text{tr} \left[\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{K_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \dot{K}(t_n) \right] + \\
 & \quad \quad \left. + \text{tr} \left[\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{K_h} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \frac{\partial K(t_n, t_h)}{\partial t_n} \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{m}_n &= [m(t_1) \dots m(t_n)]^T; \quad \bar{K}_n = \{K_{ij}(t_n, t_h)\}, \quad i, j = \overline{1, p}; \\
 |\kappa_1|, \dots, |\kappa_n| &= \overline{1, n_n}; \quad |\kappa_1 + \dots + \kappa_n| = \max \{(3, n, \dots, n_n)\}; \\
 \varphi_{3, \nu_1, \nu_2} (\bar{m}_2, \bar{K}_2, \Theta, t_2) &= M_{\Delta^y}^{w_2 p_{\nu_1, \nu_2}} \left\{ [y_1 - m(t_1)] a(y_2, \Theta, t_2)^T \right\};
 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 & \varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) = \\
 & = M_{\Delta^y}^{w_n p_{\nu_1, \dots, \nu_n}} \left\{ \frac{\partial^T q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n} (y_1, \dots, y_n)}{\partial y_n} a(y_n, \Theta, t_n) + \right. \\
 & \quad + \frac{1}{2} \text{tr} \left[\frac{\partial}{\partial y_n} \frac{\partial^T}{\partial y_n} q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n} (y_1, \dots, y_n) \sigma(y_n, \Theta, t_n) \right] + \\
 & \quad + \int_{R_0^q} \left[q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n} (y_1, \dots, y_{n-1}, y_n + c(y_n, \Theta, t_n, v)) - \right. \\
 & \quad \left. - q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n} (y_1, \dots, y_n) \frac{\partial^T q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n} (y_1, \dots, y_n)}{\partial y_n} c(y_n, \Theta, t_n, v) \right] \times \\
 & \quad \times \nu_P (\Theta, t_n, dv) \left. \right\}; \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{m_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) = M_{\Delta^y}^{w_n p_{\nu_1, \dots, \nu_n}} [q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n} (y_1, \dots, y_n)]; \quad (21)$$

$$\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{K_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) = M_{\Delta^Y}^{w_n p_{\nu_1, \dots, \nu_n}} [q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_n} (y_1, \dots, y_n)]; \quad (22)$$

$$\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{K_h} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) = M_{\Delta^y}^{w_n p_{\nu_1, \dots, \nu_n}} [q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_h} (y_1, \dots, y_n)], \quad (23)$$

где φ_{30} определяется (19) при $p_{\nu_1, \nu_2}(y_1, y_2) = p_{0,0}(y_1, y_2) = 1$, $K(t_1, t_1) = k(t_1) = K_0$; $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n} (y_1, \dots, y_n)$ — матрица-столбец производных полинома $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n} (y_1, \dots, y_n)$ по компонентам вектора $m_n = m(t_n)$; $a_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_h} (y_1, \dots, y_n)$ — квадратная матрица вторых производных полинома $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n} (y_1, \dots, y_n)$ по элементам матрицы $K(t_n, t_n)$ ($h = \overline{1, n}$); $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n} (\alpha)$ и $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_h} (\alpha)$ — результат замены одночленов $y_{11}^{r_{11}}, \dots, y_{1p}^{r_{1p}}, \dots, y_{n1}^{r_{n1}}, \dots, y_{np}^{r_{np}}$ соответствующими моментами $\alpha_{r_{11}, \dots, r_{1p}, \dots, r_{n1}, \dots, r_{np}}$ в выражениях полиномов $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n} (\alpha)$ и $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_h} (\alpha)$; функции $\varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}$, $\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}^{m_n}$, $\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}^{K_n}$ и $\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}^{K_h}$ определяются формулами (20)–(23), а $p_{\nu_1, \dots, \nu_n} (y_1, \dots, y_n) = p_{0, \dots, 0} (y_1, \dots, y_n) = 1$ для $\nu_1, \dots, \nu_n = 0$.

Начальные условия для уравнений (14)–(17) имеют следующий вид:

$$m(t_0) = m_0; \quad K(t_0, t_0) = K_0; \quad c_\nu(\Theta, t_0) = c_{\nu 0}; \quad (24)$$

$$K(\Theta, t_1, t_1) = K(\Theta, t_1); \quad c_{\nu_1, \nu_2}(\Theta, t_1, t_1) = c_{\nu_1 + \nu_2}(\Theta, t_1); \quad (25)$$

$$c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}, t_{n-1}) = c_{\kappa_1, \dots, \kappa_{n-1}, \kappa_{n-1} + \kappa_n}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}). \quad (26)$$

Таким образом, приходим к следующему результату.

Теорема 5. Если существует последовательность n -мерных согласованных распределений процесса $Y(t)$ в МСмС (1) при фиксированном векторе параметров Θ и согласованное семейство полиномов $\{p_{\nu_1, \dots, \nu_n} (y_1, \dots, y_n), q_{\nu_1, \dots, \nu_n} (y_1, \dots, y_n)\}$, то уравнения (16)–(18) при условиях (24)–(26) и конечности интегралов (19)–(23) лежат в основе МОР для многомерных распределений.

4 Метод квазимоментов для многомерных распределений

При использовании согласованных многомерных полиномов Эрмита $\{H_{\nu_1, \dots, \nu_n} (Y_1, \dots, Y_n), G_{\nu_1, \dots, \nu_n} (Y_1, \dots, Y_n)\}$ [1, 2]

$$\left. \begin{aligned} p_{\nu_1, \dots, \nu_n} (y_1, \dots, y_n; t_1, \dots, t_n) &= \\ &= \frac{H_{\nu_1, \dots, \nu_n} (y_1 - m(t_1), \dots, y_n - m(t_n))}{\nu_{11}! \dots \nu_{nr}!}; \\ q_{\nu_1, \dots, \nu_n} (y_1, \dots, y_n; t_1, \dots, t_n) &= \\ &= G_{\nu_1, \dots, \nu_n} (y_1 - m(t_1), \dots, y_n - m(t_n)) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

в уравнениях теоремы 5 следует положить

$$\left. \begin{aligned} q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, r}^{m_n}(\alpha) &= -\kappa_{nr} c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n - e_r} \\ &\quad (r = \overline{1, p}; |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = 4, n_n); \\ q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, r, s}^{K, h}(\alpha) &= -\kappa_{hr} \kappa_{ns} c_{\kappa_1, \dots, \kappa_{h-e_r}, \dots, \kappa_{n-e_s}} \\ &\quad (r, s = \overline{1, p}; h = \overline{1, (n-1)}, |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = \overline{5, n_n}); \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, rr}^{K_n}(\alpha) = -\frac{1}{2} \kappa_{nr} (\kappa_{nr} - 1) c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n - 2e_r}; \quad (29)$$

$$\left. \begin{aligned} q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, rs}^{K_n}(\alpha) &= -\kappa_{nr} \kappa_{ns} c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n - e_r - e_s} \\ &\quad (r, s = \overline{1, p}; s \neq r; |\kappa| + \dots + |\kappa| = \overline{5, n_n}); \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n}(\alpha) &= 0 \text{ при } |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = 3; \\ q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K, h}(\alpha) &= 0 \text{ при } |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = 3 \text{ и } 4. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Таким образом, имеем следующее утверждение.

Теорема 6. В основе МКМ для МСмС (1) и многомерных согласованных распределений лежат уравнения теоремы 5 при условиях (27)–(31).

5 Точность и чувствительность методов ортогональных разложений и квазимоментов для многомерных распределений

Дифференцируя уравнения теорем 5–8 по Θ аналогично уравнениям теорем 3 и 4, приходим к следующим уравнениям точности и чувствительности для многомерных распределений:

$$\nabla^\Theta \dot{m}_n = \nabla^\Theta A^{m_n} = A_0^{m_n} + A_{m_n}^{m_n} \nabla^\Theta m_n + A_{K_n}^{m_n} \nabla^\Theta K_n + A_{c_{\nu n}}^{m_n} \nabla^\Theta c_{\nu n}; \quad (32)$$

$$\nabla^\Theta \dot{K}_n = \nabla^\Theta A^{K_n} = A_0^{K_n} + A_{m_n}^{K_n} \nabla^\Theta m_n + A_{K_n}^{K_n} \nabla^\Theta K_n + A_{c_{\nu n}}^{K_n} \nabla^\Theta c_{\nu n}; \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t_2} \nabla^\Theta K(\Theta, t_1, t_2) &= \nabla^\Theta A^K = A_0^K + A_{m_2}^K \nabla^\Theta m_2 + A_{K_2}^K \nabla^\Theta K_2 + A_K^K \nabla^\Theta K + \\ &\quad + A_{c_{\nu 2}}^K \nabla^\Theta c_{\nu 2}; \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t_n} \nabla^\Theta c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(\Theta, t_1, \dots, t_n) &= \nabla^\Theta A^{c_\kappa} = A_0^{c_\kappa} + A_{m_n}^{c_\kappa} \nabla^\Theta m_n + \\ &\quad + A_{m_n}^{c_\kappa} \nabla^\Theta \dot{m}_n + A_{K_n}^{c_\kappa} \nabla^\Theta K_n + A_{K_n}^{c_\kappa} \nabla^\Theta \dot{K}_n + A_K^{c_\kappa} \nabla^\Theta K + A_{K,h}^{c_\kappa} \nabla^\Theta K, h. \end{aligned} \quad (35)$$

Таким образом, в условиях теоремы 5 уравнения чувствительности МОР имеют вид (32)–(35) (**теорема 7**), а в условиях теоремы 6 уравнения чувствительности при условиях (27)–(31) имеют вид уравнений теоремы 7 (**теорема 8**).

Приравнивая нулю правые части уравнений (32)–(35), получим конечные уравнения для соответствующих стационарных значений. Суждение о точности и устойчивости стационарных значений можно сделать на основе рассмотрения уравнений в вариациях для (32)–(35).

Как правило, начальные условия выбираются в теоремах 7 и 8 нулевыми.

Аналогично выписываются уравнения для функций чувствительности второго порядка $\nabla^\Theta(\nabla^\Theta)^T \vartheta_n^y$.

В задачах надежности и безопасности наиболее часто используются двумерные плотности для нестационарных характеристик надежности и безопасности. В таком случае применяются уравнения теорем 5, 7 и 6, 8 при $n = 2$, $\nu = [\nu_1 \nu_2]^T$. Для оценки редких событий применяются трех- и четырехмерные распределения [1, 2].

6 Пример

Рассмотрим СтС вида [1, 2]

$$\dot{Y}_t = -Y_t^3 + Y_t V(\Theta), \quad Y(t_0) = Y_0,$$

где $V = V(\Theta, t)$ — гауссовский белый шум, зависящий от случайного параметра Θ , интенсивности $\nu = \nu(\Theta)$. Уравнения теорем 1 и 3 с учетом моментов четвертого порядка $N = 4$ имеют следующий вид [1, 2, 14]:

$$\begin{aligned} \dot{m}_t &= -m_t(m_t^2 + 3D_t) - c_{3t}, \quad m(t_0) = m_0; \\ \dot{D}_t &= [\nu(\Theta) - 6D_t](m_t^2 + D_t) - 6m_t c_{3t} - 2c_{4t}, \quad D(t_0) = D_0; \\ \dot{c}_{3t} &= 6[\nu(\Theta) - 3D_t]m_tD_t + 3[\nu(\Theta) - 3m_t^2 - 9D_t]c_{3t} - 9m_t c_{yt}, \quad c_3(t_0) = c_{30}; \\ \dot{c}_{4t} &= 6[\nu(\Theta) + 2m_t^2]D_t^2 + 36D_t^3 + 4c_{3t}^2 + 12[\nu(\Theta) - 6D_t]m_tc_{3t} + \\ &\quad + 6[\nu(\Theta) - 2m_t^2 - 8D_t]c_{4t}, \quad c_4(t_0) = c_{40}; \\ \nabla \dot{m}_t &= -3(m_t^{*2} + D_t^*)\nabla m_t - 3m_t^*\nabla D_t - \nabla c_{3t}, \quad \nabla m_t(t_0) = 0; \\ \nabla \dot{D}_t &= m_t^{*2} + D_t^* + 2[m_t^*(\nu - 6D_t^*) - 3c_{3t}^*]\nabla m_t + \\ &\quad + [\nu - 6D_t^* - 6(m_t^{*2} + D_t^*)]\nabla D_t - 6m_t^*\nabla c_{2t} - 2\nabla c_{4t}, \quad \nabla D(t_0) = 0; \\ \nabla \dot{c}_{3t} &= 3(2m_t^*D_t^* + c_{3t}^*) + [6(\nu - 3D_t^*)D_t^* - 18m_t^*c_{3t}^* - 9c_{4t}^*]\nabla m_t + \\ &\quad + 3[-6m_t^*D_t^* + 2(\nu - 3D_t^*)m_t^* - 9c_{3t}^*]\nabla D_t + 3(\nu - 3m_t^{*2} - 9D_t^*)\nabla c_{3t} - \\ &\quad - 9m_t^*\nabla c_{4t}m, \quad \nabla c_3(t_0) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nabla \dot{c}_{4t} = & 6(D_t^{*2} + 2m_t^* c_{3t}^* + c_{4t}^*) + 12[m_t^* D_t^* + (\nu - 6D_t^*) c_{3t}^*] \nabla m_t + \\ & + 4[3(\nu + 2m_t^{*2}) D_t^* + 27D_t^{*2} - 18m_t^* c_{3t}^* - 12c_{4t}^*] \nabla D_t + \\ & + 4[2c_{3t}^* + 3(\nu - 6D_t^*) m_t^*] \nabla c_{3t} + 6(\nu - 2m_t^{*2} - 8D_t^*) \nabla c_{4t}, \quad \nabla c_4(t_0) = 0.\end{aligned}$$

Уравнения теоремы 6 при аппроксимации распределений отрезками разложений по полиномам Эрмита с учетом полиномов до четвертой степени, ковариационная функция и квазимоменты $c_{21} = c_{21}(\Theta, t_1, t_2)$, $c_{12} = c_{12}(\Theta, t_1, t_2)$, $c_{31} = c_{31}(\Theta, t_1, t_2)$, $c_{22} = c_{22}(\Theta, t_1, t_2)$ и $c_{13} = c_{13}(\Theta, t_1, t_2)$ двумерного распределения определяются следующими уравнениями [1, 2]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial K(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} = & -3[m(\Theta, t_2)^2 + D(\Theta, t_2)] K(\Theta, t_1, t_2) - \\ & - 3m(\Theta, t_2) c_{12}(\Theta, t_1, t_2) - c_{13}(\Theta, t_1, t_2); \quad (36)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_{21}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} = & \\ = & -3m(\Theta, t_2) K(\Theta, t_1, t_2)^2 - 3[m(\Theta, t_2)^2 + D_{\Theta, t_2}] c_{21}(\Theta, t_1, t_2) - \\ & - 6K(\Theta, t_1, t_2) c_{12}(\Theta, t_1, t_2) - 3m(\Theta, t_2) c_{22}(\Theta, t_1, t_2); \quad (37)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_{12}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} = & \\ = & 2[\nu(\Theta)m(\Theta, t_2) - 8m(\Theta, t_2)D(\Theta, t_2) - 6c_3(t_2)] K(\Theta, t_1, t_2) + \\ & + [\nu(\Theta) - 6m(\Theta, t_2)^2 - 12D(\Theta, t_2)] c_{12}(\Theta, t_1, t_2) - \\ & - 6m(\Theta, t_2) c_{13}(\Theta, t_1, t_2); \quad (38)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_{31}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} = & -6K(\Theta, t_1, t_2)^3 - 18m(\Theta, t_2) K(\Theta, t_1, t_2) c_{21}(\Theta, t_1, t_2) - \\ & - 3[m(\Theta, t_2)^2 + D(\Theta, t_2)] c_{31}(\Theta, t_1, t_2) - 9K(\Theta, t_1, t_2) c_{22}(\Theta, t_1, t_2) + \\ & + c_3(t_1) c_3(t_2); \quad (39)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial c_{22}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} = & 2[\nu(\Theta) - 6D(\Theta, t_2)] K(\Theta, t_1, t_2)^2 + \\ & + 2[\nu(\Theta)m(\Theta, t_2) - 8m(\Theta, t_2)D(\Theta, t_2) + c_3(t_2)] c_{21}(\Theta, t_1, t_2) - \\ & - 24m(\Theta, t_2) K(\Theta, t_1, t_2) c_{12}(\Theta, t_1, t_2) + \\ & + [\nu(\Theta) - 6m(\Theta, t_2)^2 - 12D(\Theta, t_2)] c_{22}(\Theta, t_1, t_2) - \\ & - 12K(\Theta, t_1, t_2) c_{13}(\Theta, t_1, t_2) + 6D(\Theta, t_1) D(\Theta, t_2)^2; \quad (40)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_{13}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} = & 3 \{ D(\Theta, t_2) [2\nu(\Theta) + 3D(\Theta, t_2)] - \\ & - 6m(\Theta, t_2) c_3(t_2) - 3c_4(t_2) \} K(\Theta, t_1, t_2) + \\ & + 3 [2\nu(\Theta)m(\Theta, t_2) - 12m(\Theta, t_2)D(\Theta, t_2) + c_3(t_2)] c_{12}(\Theta, t_1, t_2) + \\ & + 3 \left[\nu(\Theta) - 3m(\Theta, t_2)^2 - 9D(\Theta, t_2) \right] c_{13}(\Theta, t_1, t_2) \quad (41) \end{aligned}$$

и начальными условиями

$$\left. \begin{aligned} K(\Theta, t_1, t_1) &= D(\Theta, t_1); \quad c_{21}(\Theta, t_1, t_1) = c_{12}(\Theta, t_1, t_1) = c_3(t_1); \\ c_{31}(\Theta, t_1, t_1) &= c_{22}(\Theta, t_1, t_1) = c_{13}(\Theta, t_1, t_1) = c_4(t_1). \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Здесь $c_3 = G_3(\mu)$ и $c_4 = G_4(\mu)$ — линейные функции центральных моментов μ_3 и μ_4 , зависящие от $m(t)$, $D(t)$, так что одномерное разложение (3) имеет вид:

$$f_1(y; t) = [2\pi D(t)]^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{[y(t) - m(t)]^2}{2D(t)} \right\} \left\{ 1 + c_3 \frac{H_3(y(t) - m(t))}{3!} + \right. \\ \left. + c_4 \frac{H_4(y(t) - m(t))}{4!} \right\}.$$

Если воспользоваться формулой [1, 2], связывающей смешанные центральные моменты через дисперсию и ковариацию для гауссовых распределений

$$\mu_{r_1, \dots, r_s} = \begin{cases} \frac{r_1! \cdots r_s!}{2^m m!} \sum K_{h_1 l_1} \cdots K_{h_m l_m} & \text{при } r_1 + \cdots + r_s = 2m; \\ 0 & \text{при } r_1 + \cdots + r_s = 2m + 1, \end{cases}$$

то получим следующие формулы связи:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2) &= \mu_{21}(\Theta, t_1, t_2) = 0; \\ \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2) &= 3D(\Theta, t_2) K(\Theta, t_1, t_2); \\ \mu_{22}(\Theta, t_1, t_2) &= D(\Theta, t_1) D(\Theta, t_2) + 2K(\Theta, t_1, t_2)^2; \\ \mu_{31}(\Theta, t_1, t_2) &= 3D(\Theta, t_1) K(\Theta, t_1, t_2); \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_3) &= 0; \\ \mu_{112}(\Theta, t_1, t_2, t_3) &= D(\Theta, t_3) K(\Theta, t_1, t_2) + 2K(\Theta, t_1, t_3) K(\Theta, t_2, t_3); \\ \mu_{121}(\Theta, t_1, t_2, t_3) &= D(\Theta, t_2) K(\Theta, t_1, t_3) + 2K(\Theta, t_1, t_2) K(\Theta, t_2, t_3); \\ \mu_{211}(\Theta, t_1, t_2, t_3) &= D(\Theta, t_1) K(\Theta, t_2, t_3) + 2K(\Theta, t_1, t_2) K(\Theta, t_1, t_3); \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

$$\begin{aligned}\mu_{1111}(\Theta, t_1, t_2, t_3, t_4) = & K(\Theta, t_1, t_2) K(\Theta, t_3, t_4) + \\ & + K(\Theta, t_1, t_3) K(\Theta, t_2, t_4) + K(\Theta, t_1, t_4) K(\Theta, t_2, t_3).\end{aligned}\quad (45)$$

В результате уравнение (36) упрощается и принимает вид уравнения метода нормальной аппроксимации (МНА) [1, 2]

$$\begin{aligned}\frac{\partial K(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} = & -3 \left[m(\Theta, t_2)^2 + D(\Theta, t_2) \right] K(\Theta, t_1, t_2), \\ K(\Theta, t_1, t_1) = & D(\Theta, t_1),\end{aligned}$$

которое интегрируется независимо от $c_{12}, c_{21}, c_{22}, c_{13}$ и c_{31} . При этом уравнения (36)–(41) при условиях (42) и (43)–(45) существенно упрощаются. Вычисление функций чувствительности проводится согласно теоремам 7 и 8 уже для упрощенных уравнений.

Как показано в [1, 2], точные рекуррентные уравнения для одномерных начальных моментов имеют следующий вид:

$$\dot{\alpha}_{\kappa t} = -\kappa \alpha_{\kappa+2,t} + \frac{\kappa}{2} \kappa(\kappa-1) \alpha_{\kappa,t} \quad (\kappa = 1, 2, \dots). \quad (46)$$

Уравнение (46) было использовано для оценки точности МОР на основе вероятностных моментов до 4-го порядка включительно по формулам из [14]. Для оценки качества МСтС при гауссовых Θ выбрана условная функция потерь ρ , допускающая квадратическую аппроксимацию

$$\begin{aligned}\rho = \rho(\Theta) = & \rho(m^\Theta) + \sum_{i=1}^{p^\Theta} \rho'_i(m^\Theta) \Theta_i^0 + \sum_{i,j=1}^{p^\Theta} \rho''_{ij}(m^\Theta) \Theta_i^0 \Theta_j^0; \\ \varepsilon = & \varepsilon_2^{1/4}, \quad \varepsilon_2 = M^N [\rho(\Theta)]^2 - \rho(m^\Theta)^2,\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}M^N [\rho(\Theta)]^2 = & \rho(m^\Theta)^2 + \rho'(m^\Theta)^T K^\Theta \rho'(m^\Theta) + 2\rho(m^\Theta) \text{tr} [\rho''(m^\Theta) K^\Theta] + \\ & + \left\{ \text{tr} [\rho''(m^\Theta) K^\Theta] \right\}^2 + 2\text{tr} [\rho''(m^\Theta) K^\Theta]^2.\end{aligned}$$

При критерии ρ минимума средней квадратической ошибки относительная точность МОР/МНА составляет менее 10% и 1% при $m^\Theta/\sqrt{D^\Theta} = 1$ и 0,5 соответственно, что достаточно для многих приложений.

7 Заключение

Для нелинейных дифференциальных СтС, понимаемых в смысле Ито, в том числе и на многообразиях, разработаны МОР и МКМ для аналитического моделирования одно- и многомерных распределений.

Получены уравнения точности и чувствительности методов. Отмечено, что двумерные распределения и их разложения применяются для оценки нестационарных характеристик надежности и безопасности, а трех- и четырехмерные — для оценки редких событий.

Результаты положены в основу модуля инструментального символьного программного обеспечения в среде MATLAB-MAPLE.

В качестве дальнейших обобщений можно рассмотреть дискретные и непрерывно-дискретные системы на многообразиях. Значительный интерес представляют стационарные и приводимые к стационарным процессы в СтС и в первую очередь в системах, допускающих распределения с инвариантной мерой.

Литература

1. Пугачев В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с. (Англ. пер. *Pugachev V. S., Sinitsyn I. N. Stochastic differential systems. Analysis and filtering.* — Chichester, NY, USA: John Wiley, 1987. 549 p.)
2. Пугачев В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000. 1000 с.
3. Синицын И. Н. Стохастические информационные технологии для исследования нелинейных круговых стохастических систем // Информатика и её применения, 2011. Т. 5 Вып. 4. С. 78–89.
4. Sinitsyn I. N., Belousov V. V., Konashenkova T. D. Software tools for circular stochastic systems analysis // 29th Seminar (International) on Stability Problems for Stochastic Models: Abstracts. — М.: ИПИ РАН, 2011. С. 86–87.
5. Синицын И. Н. Математическое обеспечение для анализа нелинейных многоканальных круговых стохастических систем, основанное на параметризации распределений // Информатика и её применения, 2012. Т. 6. Вып. 1. С. 12–18.
6. Синицын И. Н., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Конашенкова Т. Д. Развитие математического обеспечения для анализа нелинейных многоканальных круговых стохастических систем // Системы и средства информатики, 2012. Вып. 22. № 1. С. 29–40.
7. Sinitsyn I. N., Belousov V. V., Konashenkova T. D. Software tools for spherical stochastic systems analysis and filtering // Прикладные задачи теории вероятности и математической статистики, связанные с моделированием информационных систем (АРТР + MS'2012): Сб. тезисов Междунар. семинара по проблемам устойчивости стохастических моделей (ISSPSM-2012) и 6-го Междунар. рабочего семинара. — М.: ИПИ РАН, 2012. С. 91–93.
8. Синицын И. Н. Параметрическое статистическое и аналитическое моделирование распределений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 2. С. 4–16.

9. Синицын И. Н., Синицын В. И. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными нелинейностями // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 3. С. 2–4.
10. Синицын И. Н., Синицын В. И., Сергеев И. В., Белоусов В. В., Шоргин В. С. Математическое обеспечение аналитического моделирования стохастических систем со сложными нелинейностями // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 3. С. 4–29.
11. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р. Моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными иррациональными нелинейностями // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 1. С. 2–8.
12. Синицын И. Н., Синицын В. И., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Шоргин В. С. Математическое обеспечение моделирования нормальных процессов в стохастических системах со сложными иррациональными нелинейностями // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 2. С. 45–61.
13. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р. Моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными трансцендентными нелинейностями // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 2. С. 23–29.
14. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование распределений методом ортогональных разложений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 3. С. 17–24.
15. ГОСТ 23743–88. Изделия авиационной техники. Номенклатура показателей безопасности полета, надежности, контролепригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности.
16. Болотин В. В. Теория надежности машин // Машиностроение: Энциклопедия. Т. IV-3. Надежность машин. — М.: Машиностроение, 1998.
17. Александровская Л. Н., Аронов И. З., Круглов В. И. и др. Безопасность и надежность технических систем. — М.: Университетская книга, Логос, 2008. 376 с.
18. Ватанабэ С., Икэда Н. Стохастические дифференциальные уравнения и диффузионные процессы / Пер. с англ. — М.: Наука, 1986. 448 с. (Watanabe S, Ikeda N. Stochastic differential equations and diffusion processes. — Amsterdam – Oxford – New York: North-Holland Publishing Co.; Tokyo: Kodansha Ltd., 1981. 476 p.)
19. Евланов А. Г., Константинов В. М. Системы со случайными параметрами. — М.: Наука, 1976. 568 с.
20. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — М.: Наука, 1987. 712 с.

Поступила в редакцию 09.06.15

APPLICATIONS OF ORTHOGONAL EXPANSIONS FOR ANALYTICAL MODELING OF MULTIDIMENSIONAL DISTRIBUTIONS IN STOCHASTIC SYSTEMS ON MANIFOLD

I. N. Sinitsyn

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

Abstract: Problems of accuracy and sensitivity estimation for algorithms of the analytical modeling method (AMM) based on the multidimensional orthogonal expansions method (OEM) and quasi-moments (QMM) in stochastic systems on manifolds (MStS) with Wiener and Poisson noises are considered. Equations for multidimensional OEM and QMM are given. Problems of reduction of the number of equations for OEM and QMM are discussed. For typical reliability and security problems, equations for OEM and QMM sensitivity functions of the first order are deduced. The results are the basis of the symbolic software tools in MATLAB-MAPLE. A test example for scalar stochastic systems with cubic nonlinearity and multiplicative Gaussian noise is given. Some generalizations are presented.

Keywords: accuracy equations; analytical modeling method (AMM); one- and multidimensional density expansions; orthogonal expansions method (OEM); quasi-moments method (QMM); sensitivity equations; stochastic system on manifold (MStS)

DOI: 10.14357/08696527150301

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-07-02244).

References

1. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester, NY: Jonh Wiley. 549 p.
2. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
3. Sinitsyn, I. N. 2011. Stokhasticheskie informatsionnye tekhnologii dlya issledovaniya nelineynykh krugovykh stokhasticheskikh sistem [Stochastic informational technologies for circular stochastic systems investigation]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 5(4):78–89.

4. Sinitsyn, I. N., V. V. Belousov, and T. D. Konashenkova. 2011. Software tools for circular stochastic systems analysis. *29th Seminar (International) on Stability Problems for Stochastic Models: Abstracts*. Moscow: IPI RAN. 86–87.
5. Sinitsyn, I. N. 2012. Matematicheskoe obespechenie dlya analiza nelineynykh mnogokanal'nykh krugovykh stokhasticheskikh sistem, osnovannoe na parametrizatsii raspredeleniy [Mathematical software for analysis of nonlinear multichannel circular stochastic systems based on distributions parametrization]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 6(1):12–18.
6. Sinitsyn, I. N., E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and T. D. Konashenkova. 2012. Razvitiye matematicheskogo obespecheniya dlya analiza nelineynykh mnogokanal'nykh krugovykh stokhasticheskikh sistem [Development of mathematical software for analysis of nonlinear multichannel circular stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 22(1):29–40.
7. Sinitsyn, I. N., V. V. Belousov, and T. D. Konashenkova. 2012. Software tools for spherical stochastic systems analysis and filtering. *Prikladnye zadachi teorii veroyatnosti i matematicheskoy statistiki, svyazannye s modelirovaniem informatsionnykh sistem (ARTR+MS'2012): Sb. tezisov Mezhdunar. Seminara po problemam ustoychivosti stokhasticheskikh modeley (ISSPSM-2012) i 6-go Mezhdunar. rabochego Seminara* [Applied tasks of the probability theory and mathematical statistics connected with modeling of information systems: Book of abstracts]. Moscow: IPI RAN. 91–93.
8. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Parametric statistical and analytical modeling of distributions in nonlinear stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 7(2):4–16.
9. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2014. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi nelineynostyami [Analytical modeling of normal processes stochastic systems with complex nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 8(3):2–4.
10. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, I. V. Sergeev, V. V. Belousov, and V. S. Shorgin. 2014. Matematicheskoe obespechenie analiticheskogo modelirovaniya stokhasticheskikh sistem so slozhnymi nelineynostyami [Mathematical software for analytical modeling of stochastic systems with complex nonlinearities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(3):4–29.
11. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, and E. R. Korepanov. 2015. Modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi irratsional'nymi nelineynostyami [Modeling of normal processes in stochastic systems with complex irrational nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 9(1):2–8.
12. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and V. S. Shorgin. 2015. Matematicheskoe obespechenie modelirovaniya normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi irratsional'nymi nelineynostyami [Mathematical software for modeling of normal processes in stochastic systems with complex irrational nonlinearities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(2):45–61.
13. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, and E. R. Korepanov. 2015. Modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi transsendentnymi nelineynostyami [Analytical modeling of distributions in systems with complex transcendental nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(2):23–29.

14. Sinitsyn, I. N. 2015. Analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy metodom ortogonal'nykh razlozhenii v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Analytical modeling in stochastic systems on manifolds based on orthogonal expansions]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 9(3):17–24.
15. GOST 23743–88. Izdelya aviationskoy tekhniki. Nomenklatura pokazateley bezopasnosti poleta, nadezhnosti, kontroleprigodnosti, ekspluatatsionnoy i remontnoy tekhnologichnosti [Nomenclature of security and reliability indexers].
16. Bolotin, V. V. 1998. Teoriya nadezhnosti mashin [Theory of machine reliability]. *Mashinostroenie. Entsiklopetsiya* [Mechanical engineering Encyclopedia]. Nadezhnost' mashin [Reliability of machines]. Moscow: Mashinostroenie. IV-3.
17. Aleksandrovskaia, L. N., I. Z. Aronov, V. I. Kruglov, et al. 2008. Bezopasnost' i nadezhnost' tekhnicheskikh sistem [Security and reliability of technical systems]. Moscow: Universitetskaya Kniga, Logos. 376 p.
18. Watanabe, S., and N. Ikeda. 1981. *Stochastic differential equations and diffusion processes*. Amsterdam–Oxford–New York: North-Holland Publishing Co.; Tokyo: Kodansha Ltd. 476 p.
19. Evlanov, A. G., and V. M. Konstantinov. 1976 *Sistemy so slozhnymi parametrami* [Systems with random parameters]. Moscow: Nauka. 568 p.
20. Krasovskii, A. A., ed. 1987. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook for automatic control]. Moscow: Nauka. 712 p.

Received June 9, 2015

Contributor

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

МЕТОДЫ МОМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА МНОГООБРАЗИЯХ*

И. Н. Синицын¹

Аннотация: Рассматриваются вопросы оценки точности и чувствительности алгоритмов параметрического аналитического моделирования одно- и многомерных распределений в стохастических системах (СтС) на многообразиях (МСтС) с винеровскими и пуассоновскими шумами на базе методов начальных моментов (МНМ) и центральных моментов (МЦМ). Выведены уравнения точности и чувствительности алгоритмов аналитического моделирования (МАМ). Рассмотрены вопросы сокращения числа уравнений МНМ и МЦМ для одно- и многомерных распределений. Результаты положены в основу модуля разрабатываемого инструментального символьного программного обеспечения методов аналитического моделирования (МАМ) в среде MATLAB-MAPLE. В качестве иллюстративного примера изучена одномерная нелинейная МСтС с мультипликативным гауссовским (нормальным) белым шумом. Сформулированы возможные обобщения.

Ключевые слова: метод аналитического моделирования (МАМ); метод начальных моментов (МНМ); метод центральных моментов (МЦМ); плотность одно- и многомерного распределения; полиномы Эрмита; стохастическая система на многообразиях (МСтС); уравнения точности МНМ и МЦМ; уравнения чувствительности МНМ и МЦМ

DOI: 10.14357/08696527150302

1 Введение

Методы аналитического моделирования распределений процессов в СтС, описываемых дифференциальными стохастическими уравнениями Ито с винеровскими и пуассоновскими шумами, основанные на параметризации их распределений, получили широкое практическое применение в задачах управления и информатики [1, 2]. В [3] развиты дискретные методы параметрического статистического и аналитического моделирования в МСтС, рассмотрены приближенные методы статистического моделирования (МСМ) различной точности и МАМ, основанные на ортогональных разложениях, а также подробно развита нелинейная корреляционная теория МСМ и МАМ. В [4, 5] применительно

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-07-02244).

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

к типовым задачам оценки надежности и безопасности технических систем [6–8] рассмотрены вопросы оценки точности и чувствительности параметрических алгоритмов МАМ одно- и многомерных распределений процессов по методу ортогональных разложений (МОР) и квазимоментов (МКМ) в нелинейных не-гауссовских дифференциальных МСтС.

Статья посвящена вопросам аналитического моделирования распределений в МСтС на основе МНМ и МЦМ. В разд. 2 изложены МНМ и МЦМ для одномерных распределений в МСтС, а МНМ и МЦМ для многомерных распределений — в разд. 3. Точность и чувствительность МНМ и МЦМ рассмотрены в разд. 4. Вопросы сокращения числа уравнений МНМ и МЦМ обсуждаются в разд. 5. Тестовый пример приводится в разд. 6. Заключение содержит выводы и некоторые обобщения.

2 Методы начальных и центральных моментов для одномерных распределений

Следуя [1–3], рассмотрим дифференциальное стохастическое уравнение Ито вида

$$dY_t = a(Y_t, \Theta, t) dt + b(Y_t, \Theta, t) dW_0 + \int_{R_0^q} c(Y_t, \Theta, t, v) dP^0(\Theta, t, dv). \quad (1)$$

Здесь Y_t — p -мерный вектор состояния, $Y_t \in \Delta^y$ (Δ^y — многообразие состояний); Θ — вектор случайных параметров размерности p^Θ ; $a = a(y_t, \Theta, t)$ и $b = b(y_t, \Theta, t)$ — известные ($p \times 1$)- и ($p \times r$)-мерные функции вектора Y_t и времени t ; $W_0 = W_0(\Theta, t)$ — r -мерный винеровский стохастический процесс интенсивности $\nu_0 = \nu_0(\Theta, t)$; $c(y_t, \Theta, t, v)$ — ($p \times 1$)-мерная функция y_t, t и вспомогательного ($q \times 1$)-мерного параметра v ; $\int dP^0(\Theta, t, A)$ — центрированная пуассоновская мера:

$$\int_{\Delta} dP^0(\Theta, t, A) = \int_{\Delta} dP(\Theta, t, A) - \int_{\Delta} \nu_P(\Theta, t, A) dt,$$

где $\int_{\Delta} dP(\Theta, t, A)$ — число скачков пуассоновского процесса в интервале времени Δ ; $\nu_P(\Theta, t, A)$ — интенсивность пуассоновского процесса $P(t, A)$; A — некоторое борелевское множество пространства R_0^q с выколотым началом координат. Интеграл (1) в общем случае распространяется на все пространство R_0^q с выколотым началом координат. Начальное значение Y_0 вектора Y_t представляет собой случайную величину (СВ), не зависящую от приращений винеровского процесса $W_0(\Theta, t)$ и пуассоновского процесса $P(\Theta, t, A)$ на интервалах времени $\Delta = (t_1, t_2]$, следующих за t_0 , $t_0 \leq t_1 \leq t_2$, для любого множества A .

Для вычисления вероятностей событий, связанных со случайными функциями, в прикладных задачах достаточно знания многомерных распределений [1, 2].

Поэтому центральной задачей прикладной теории МСтС является задача вероятностного анализа одно- и многомерных распределений процессов, удовлетворяющих дифференциальному стохастическому уравнению Ито (1) при соответствующих начальных условиях. В теории МСтС различают два принципиально разных подхода к вычислению распределений. Первый общий подход основан на статистическом моделировании, т. е. на прямом численном решении (1) с последующей статистической обработкой результатов. Второй общий подход основан на теории непрерывных марковских процессов и предполагает аналитическое моделирование, т. е. решение детерминированных уравнений в функциональных пространствах (уравнений Фоккера–Планка–Колмогорова, Феллера–Колмогорова, Пугачёва и др.) для одно- и многомерных распределений. В практических задачах часто используют и комбинированные методы. При этом будем предполагать, что существуют одно- и многомерные плотности процессов в МСтС (1). Достаточные условия их существования можно найти, например, в [9].

В настоящем разделе будем полагать, что, во-первых, одномерные плотности распределений существуют и, во-вторых, их плотности можно параметризовать с помощью условных параметров $\vartheta^y = \vartheta^y(\Theta, t)$: вероятностных начальных и центральных моментов [1, 2].

Будем пользоваться известной обобщенной формулой Ито [1, 2] для дифференциала нелинейной функции $\varphi(Y_t, \Theta, t)$:

$$\begin{aligned} d\varphi(Y_t, \Theta, t) = & \left\{ \varphi_t(Y_t, \Theta, t) + \varphi_Y(Y_t, \Theta, t)^T a(Y_t, \Theta, t) + \right. \\ & + \frac{1}{2} \text{tr} \left[\varphi_{YY}(Y_t, \Theta, t) b(Y_t, \Theta, t) \nu_0(\Theta, t) b(Y_t, \Theta, t)^T \right] \left. \right\} dt + \\ & + \int_{R_0^q} \left[\varphi \left(Y_t + c(Y_t, \Theta, t, v) - \varphi(Y_t, \Theta, t) - \varphi(Y_t, \Theta, t)^T c(Y_t, \Theta, t, v), t \right) - \right. \\ & - \varphi(Y_t, \Theta, t) - \varphi_Y(Y_t, \Theta, t)^T c(Y_t, \Theta, t, v) \left. \right] \nu_P(\Theta, dt, dv) + \\ & + \varphi_Y(Y_t, \Theta, t)^T b(Y_t, \Theta, t) dW_0(\Theta, t) + \\ & + \int_{R_0^q} [\varphi(Y_t + c(Y_t, \Theta, t, v), \Theta, t) - \varphi(Y_t, \Theta, t)] P_0(\Theta, dt, dv). \quad (2) \end{aligned}$$

Следуя [4, 5], представим уравнения МОР в виде следующего отрезка разложения:

$$f_1 = f_1(y_t, \Theta, \vartheta^y, t) \approx w_1(y_t, \Theta) \left[1 + \sum_{l=3}^{n_1} \sum_{|\nu|=l} c_{\nu t}(\Theta, t) p_\nu(y_t) \right]. \quad (3)$$

Здесь $w_1 = w_1(y_t; \Theta)$ — эталонная одномерная плотность, выбираемая из условия совпадения первых двух вероятностных моментов для w_1 и f_1 ; $\{p_\nu(y_t), q_\nu(y_t)\}$ —

система биортонормальных полиномов с весом w_1 , т. е. удовлетворяющих условию

$$\mathbb{M}_{\Delta^y}^{w_1} [p_\nu(Y_t) q_\mu(Y_t)] = \delta_{\nu\mu} = \begin{cases} 0 & \text{при } \mu \neq \nu; \\ 1 & \text{при } \mu = \nu; \end{cases}$$

$\mathbb{M}_{\Delta^y}^{w_1}$ — символ математического ожидания в области Δ^y ; $\vartheta^y = \{\alpha_t\}$ или $\{m_t, K_t, \mu_t\}$ — условные начальные и центральные моменты, где $m_t = m(\Theta, t)$, $K_t = K(\Theta, t)$ — коэффициенты ортогонального разложения $c_{\nu t} = c_{\nu t}(\Theta, t)$, удовлетворяющие условию

$$c_{\nu t} = \mathbb{M}_{\Delta^y}^f [q_\nu(Y_t)] = q_\nu(\alpha), \quad (4)$$

где $q_\nu(\alpha)$ представляет собой комбинацию условных начальных моментов α_t вектора Y_t (до порядка n_1 включительно), полученную из $q_\nu(x)$ заменой всех одночленов $x_1^{k_1}, \dots, x_r^{k_r}$ соответствующими моментами $\alpha_{k_1}, \dots, \alpha_{k_r}$, $\nu = \{\nu_1\} + \dots + \{\nu_p\} = 3, \dots, n_1; \nu_1, \dots, \nu_p = 0, 1, \dots, n_1$.

Будем пользоваться векторной нумерацией полиномов $\{p_\nu, q_\nu\}$ так, чтобы сумма координат $|\nu| = \nu_1 + \dots + \nu_r$ векторного индекса $\nu = [\nu_1 \dots \nu_r]^T$ была равна степени полиномов. Тогда число линейно независимых полиномов данной степени $\nu_* = |\nu|$ будет равно числу независимых одночленов степени ν_* , т. е. $C_{r+\nu_*-1}^{\nu_*}$. Отметим также, что согласно [1, 2] существование всех моментов для плотности необходимо и достаточно для существования интегралов (4).

Замечание 1. Коэффициенты полиномов $p_\nu(y)$ и $q_\nu(y)$ в общем случае зависят от моментов первого и второго порядка вектора $Y(t)$, поскольку плотность $w_1(y)$ в (1) имеет те же моменты первого и второго порядка, что и $f_1(y; t)$.

Пользуясь обобщенной формулой Ито (2) для вычисления дифференциала произведения $Y_1^{r_1} \dots Y_p^{r_p}$, приедем к следующим обыкновенным дифференциальным уравнениям для условных начальных моментов $\alpha_r = \alpha_r(\Theta, t)$:

$$\dot{\alpha}_r = A^\alpha(m, K, \alpha, \Theta, t) = \varphi_{r,0}(m, K, \Theta, t) + \sum_{k=3}^N \sum_{|\nu|=k} \varphi_{r,\nu}(m, K, \Theta, t) q_\nu(\alpha) \\ (r_1, \dots, r_p = 0, 1, \dots, n_1; |r| = 1, \dots, n_1), \quad (5)$$

где

$$\varphi_{r,\nu}(m, K, \Theta, t) = \sum_{s=1}^p \nu_s \mathbb{M}_{\Delta^y}^{w_1 p_r} Y_1^{\nu_1} \dots Y_s^{\nu_{s-1}} \dots Y_p^{\nu_p} a_s(Y, \Theta, t) + \\ + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^p \nu_s (\nu_s - 1) \mathbb{M}_{\Delta^y}^{w_1 p_r} Y_1^{\nu_1} \dots Y_s^{\nu_{s-2}} \dots Y_p^{\nu_p} \sigma_{ss}(Y, \Theta, t) + \\ + \sum_{s=2}^p \sum_{l=1}^{s-1} \nu_s \nu_l \mathbb{M}_{\Delta^y}^{w_1 p_l} Y_1^{\nu_1} \dots Y_l^{\nu_{l-1}} \dots Y_s^{\nu_{s-1}} \dots Y_p^{\nu_p} \sigma_{sl}(Y, \Theta, t) +$$

$$+ M_{\Delta^y}^{w_1 p_r} \int_{R_0^q} \left\{ [Y_1 + c_1(Y, \Theta, t, u)]^{\nu_1} \cdots [Y_p + c_p(Y, \Theta, t, u)]^{\nu_p} - \right. \\ \left. - Y_1^{\nu_1} \cdots Y_p^{\nu_p} - \sum_{s=1}^p \nu_s Y_1^{\nu_1} \cdots Y_s^{\nu_{s-1}} \cdots Y_p^{\nu_p} c_s(Y, \Theta, t, u) \right\} \nu_P(\Theta, t, du). \quad (6)$$

При этом функции $\varphi_{r,0}(m, K, \Theta, t)$ получаются из последней формулы при $p_r(y) = p_0 = 1$.

Интегрируя систему уравнений (5) при начальных условиях

$$\alpha_r(\Theta, t_0) = \alpha_r^0 \quad (r_1, \dots, r_p = 0, 1, \dots, n_1; |r| = 1, \dots, n_1), \quad (7)$$

найдем все координаты вектора ϑ_y как функции Θ и времени t (α_r^0 — моменты начального значения Y_0 вектора $Y(t)$ при $t = t_0$).

Замечание 2. Уравнения (5) линейны относительно моментов α_r выше второго порядка, $|r| = 3, \dots, N$, и нелинейны относительно моментов первого и второго порядка, поскольку плотность $w_1(y)$ и коэффициенты полиномов $p_\nu(y)$ и $q_\nu(y)$ зависят от моментов первого и второго порядка, вследствие чего и коэффициенты $\varphi_{r,0}$ и $\varphi_{r,\nu}$ уравнений (5) зависят от указанных моментов.

Замечание 3. При составлении уравнений (5) в конкретных задачах полезно иметь в виду, что число N_q^r моментов r -го порядка, а также полное число моментов порядков, не превосходящих N , q -мерного случайного вектора определяются формулами:

$$N_q^r = C_{q+r-1}^r = \frac{(q+r-1)!}{r!(q-1)!}; \quad P_q^N = \sum_{r=1}^N N_q^r = C_{N+q}^N - 1 = \frac{(N+q)!}{N!q!} - 1. \quad (8)$$

Разложение (3) может быть, в частности, разложением $f_1(y; t)$ по полиномам Эрмита. Можно также пользоваться для аппроксимации $f_1(y; t)$ отрезком ряда Эджуорта [1, 2]. В этом случае число слагаемых в сумме (3) при учете моментов до N -го порядка возрастает до $3N - 6$, вследствие чего можно рассчитывать на большую точность аппроксимации.

Таким образом, в основе теоремы 1 лежит следующее утверждение.

Теорема 1. Если существует одномерное распределение процесса $Y_t = Y(t)$ в МСтС (1), конечны интегралы (6) при фиксированном векторе параметров Θ и полиномиальны $\{p_\nu(y_t), q_\nu(y_t)\}$, то в основе МНМ лежат уравнения (5) при начальных условиях (7).

Применяя обобщенную формулу Ито (2) к произведению $[Y_1(t) - m_1(t)]^{r_1} \cdots [Y_p(t) - m_p(t)]^{r_p}$, придем к следующим обыкновенным дифференциальным уравнениям для $m(t)$, $K(t)$:

$$\dot{m} = A^m(m, K, \alpha, \Theta, t) = \varphi_{1,0}(m, K, \Theta, t) + \sum_{l=3}^N \sum_{|\nu|=l} \varphi_{1,\nu}(m, K, \Theta, t) q_\nu(\alpha); \quad (9)$$

$$\dot{K} = A^K(m, K, \alpha, \Theta, t) = \varphi_{2,0}(m, K, \Theta, t) + \\ + \sum_{l=3}^N \sum_{|\nu|=l} \varphi_{2,\nu}(m, K, \Theta, t) q_\nu(\alpha), \quad (10)$$

где

$$\varphi_{1,\nu}(m, K, \Theta, t) = M_{\Delta^y}^{w_1 p_\nu} a(Y, \Theta, t); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{2,\nu}(m, K, \Theta, t) &= \\ &= M_{\Delta^y}^{w_1 p_\nu} \left[a(Y, \Theta, t)(Y^T - m^T) + (Y - m)a(Y, \Theta, t)^T + \bar{\sigma}(Y, \Theta, t) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

(коэффициенты $\varphi_{1,0}(m, K, \Theta, t)$ и $\varphi_{2,0}(m, K, \Theta, t)$ определяются формулами (11) и (12) при $p_\nu = p_0(y) = 1$ с заменой ν на 0) и для центральных моментов $\mu_r(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{\mu}_r &= A^{\mu_r}(m, K, \mu_r, \Theta, t) = \varphi_{r,0}(m, K, \Theta, t) + \\ &+ \sum_{l=3}^N \sum_{|\nu|=l} \varphi_{r,\nu}(m, K, \Theta, t) q_\nu(\alpha) - \sum_{s=1}^p r_s \mu_{r-e_s} \dot{m}_s \quad (|r| = 3, \dots, n_1). \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь функции $\varphi_{r,\nu}(m, K, \Theta, t)$ определяются согласно (6) путем замены произведений $y_1 \cdots y_p$ на $(y_1 - m_1) \cdots (y_p - m_p)$, а e_s — вектор, все компоненты которого равны 0, кроме s -й, равной 1; начальные моменты в $q_\nu(\alpha)$ должны быть выражены через центральные.

Интегрируя уравнения (9) и (13) при соответствующих начальных условиях

$$\left. \begin{aligned} m(\Theta, t_0) &= m_0; \\ \mu_r(\Theta, t_0) &= \mu_r^0 \quad (r_1, \dots, r_p = 0, 1, \dots, n_1; \quad |r| = 2, \dots, n_1), \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

найдем все координаты вектора ϑ^y как функции Θ и времени t .

Замечание 4. Уравнения (9) и (13) всегда нелинейны из-за наличия слагаемых вида $\mu_{r-e_h} q_\nu(\alpha)$. При применении ортогональных разложений по полиномам Эрмита согласно методу квазимоментов [4, 5] $q_\nu(\alpha) = G_\nu(\mu)$ и, следовательно, $q_\nu(\alpha)$ автоматически получаются как линейные комбинации центральных моментов.

Таким образом, имеем следующее утверждение.

Теорема 2. В основе МЦМ для МСтС (1) при фиксированном векторе параметров Θ и конечности интегралов (11) и (12) лежат уравнения (9), (10) и (13) при начальных условиях (14).

Если существуют стационарные моменты α_r^* , то согласно МНМ и МЦМ они определяются конечными уравнениями

$$A^\alpha(\alpha^*, \Theta) = 0; \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} A^m(m^*, K^*, \alpha^*, \Theta) &= 0; & A^K(m^*, K^*, \alpha^*, \Theta) &= 0; \\ A^{\mu_r}(m^*, K^*, \alpha^*, \Theta) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Для приближенной оценки их устойчивости необходимо рассмотреть устойчивость соответствующих (15) и (16) уравнений в вариациях.

3 Методы начальных и центральных моментов для многомерных распределений

Совершенно так же, как в разд. 2, выводятся уравнения для начальных и центральных моментов многомерных распределений в случае, когда распределение допускает параметризацию вероятностными начальными и центральными моментами.

Для стохастической системы (1) многомерная аппроксимация распределения начальными моментами

$$\begin{aligned} \alpha_{r_{11}, \dots, r_{1p}, \dots, r_{n1}, \dots, r_{np}}(\Theta, t_1, \dots, t_n) &= \\ = M_{\Delta^y} Y_1^{r_{11}}(\Theta, t_1) \cdots Y_p^{r_{1p}}(\Theta, t_1) \cdots Y_1^{r_{n1}}(\Theta, t_n) \cdots Y_p^{r_{np}}(\Theta, t_n), \end{aligned}$$

согласно [1, 2, 4], определяется следующими формулами:

$$f_n(y_1, \dots, y_n; \Theta, t_1, \dots, t_n) \approx w_n(y_1, \dots, y_n, \Theta) \times \\ \times \left\{ 1 + \sum_{l=1}^{h_n} \sum_{|\nu_1| + \dots + |\nu_n| = l} c_{\nu_1, \dots, \nu_n} p_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1, \dots, y_n) \right\}; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}}{\partial t_n} &= \varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}(\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) + \\ &+ \sum_{l=3}^{h_n} \sum_{|\nu_1| + \dots + |\nu_n| = l} q_{\nu_1, \dots, \nu_n}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}(\bar{m}, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \\ (|\kappa_1|, \dots, |\kappa_n| &= 1, \dots, h_n, |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = n, \dots, h_n), \quad (18) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n; \nu_1, \dots, \nu_n}(\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) &= \\ = \sum_{s=1}^p \nu_{ns} M_{\Delta^y}^{w_n p_\nu} Y_{11}^{\nu_{11}} \cdots Y_{1p}^{\nu_{1p}} \cdots Y_{n-1,1}^{\nu_{n-1,1}} \cdots Y_{n-1,p}^{\nu_{n-1,p}} Y_{n1}^{\nu_{n1}} \cdots Y_{ns}^{\nu_{ns}-1} \cdots \\ \cdots Y_{np}^{\nu_{np}} a_s(Y_n, \Theta, t_n) + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^p \nu_{ns} (\nu_{ns} - 1) M_{\Delta^y}^{w_n p_\nu} Y_{11}^{\nu_{11}} \cdots Y_{1p}^{\nu_{1p}} \cdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdots Y_{n-1,1}^{\nu_{n-1,1}} \cdots Y_{n-1,p}^{\nu_{n-1,p}} Y_{n1}^{\nu_{n1}} \cdots Y_{ns}^{\nu_{ns}-2} \cdots Y_{np}^{\nu_{np}} \sigma_{ss}(Y_n, \Theta, t_n) + \\
& + \sum_{s=2}^p \sum_{n=1}^{s-1} \nu_{ns} \nu_{nr} M_{\Delta^y}^{w_n p_\nu} Y_{11}^{\nu_{11}} \cdots Y_{1p}^{\nu_{1p}} \cdots \\
& \cdots Y_{n-1,1}^{\nu_{n-1,1}} \cdots Y_{n-1,p}^{\nu_{n-1,p}} Y_{n1}^{\nu_{n1}} \cdots Y_{nr}^{\nu_{nr}-1} \cdots Y_{ns}^{\nu_{ns}-1} \cdots Y_{np}^{\nu_{np}} \sigma_{sr}(Y_n, \Theta, t_n) + \\
& + M_{\Delta^y}^{w_n p_\nu} \int_{R_0^q} Y_{11}^{\nu_{11}} \cdots Y_{1p}^{\nu_{1p}} \cdots Y_{n-1,1}^{\nu_{n-1,1}} \cdots Y_{\nu-1,p}^{\nu_{\nu-1,p}} \times \\
& \times \left\{ [Y_{n1} + c_1(Y_n, \Theta, t_n, u)]^{\nu_{n1}} \cdots [Y_{np} + c_p(Y_n, \Theta, t_n, u)]^{\nu_{np}} - Y_{n1}^{\nu_{n1}} \cdots Y_{np}^{\nu_{np}} - \right. \\
& \left. - \sum_{s=1}^p \nu_{ns} Y_{n1}^{\nu_{n1}} \cdots Y_{ns}^{\nu_{ns}-1} \cdots Y_{np}^{\nu_{np}} c_s(Y_n, \Theta, t_n, u) \right\} \nu_P(\Theta, t_n, du) \\
& (|\kappa_1| + \cdots + |\kappa_n| = 3, \dots, n_n; |\nu_1| + \cdots + |\nu_n| = 0, 1, \dots, n_n; \\
& |\nu_1| + \cdots + |\nu_n| = 3, \dots, n_n). \quad (19)
\end{aligned}$$

При этом функции $\varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}$ в (17) определяются (18) при $p_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1, \dots, y_n) = p_{0, \dots, 0}(y_n) = 1$ и $\nu_1, \dots, \nu_n = 0$. Начальные условия для (18) имеют вид:

$$\alpha_{r_1, \dots, r_n}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}, t_{n-1}) = \alpha_{r_1, \dots, r_{n-1}+r_n}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}). \quad (20)$$

Замечание 5. При составлении уравнений для моментов n -мерного распределения, согласно МНМ, следует ограничиться только теми моментами, которые зависят от всех n переменных t_1, \dots, t_n , т. е. для которых ни одна из сумм $|r_1|, \dots, |r_n|$ не равна нулю, так как моменты, зависящие только от части переменных t_1, \dots, t_n , например от t_{r+1}, \dots, t_n , представляют собой моменты $(n-k)$ -мерного распределения и, следовательно, определены раньше при аппроксимации $(n-k)$ -мерного распределения. Естественно, что уравнения (18) при $|r_1| = \cdots = |r_n| = 0$ совпадают с соответствующими уравнениями для моментов $(n-k)$ -мерного распределения. Если при всех n аппроксимирующая функция зависит от моментов не выше N -го порядка, то при $n = h_n$ придется составлять уравнения (18) только для вероятностных моментов, соответствующих $|r_1| = \cdots = |r_n| = 0$, и после определения h_n -мерного распределения все остальные многомерные распределения будут определены однозначно. В частности, при аппроксимации всех многомерных плотностей, например согласованными ортогональными разложениями, с учетом моментов не выше h_n -го порядка все многомерные распределения процесса $Y(t)$ будут однозначно определены после нахождения моментов h_n -мерного распределения. Уравнения (18) при $n > 2$ являются линейными обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Теперь приведем уравнения МЦМ для центральных моментов n -мерного распределения стохастического процесса $Y(t)$ при $t_1 < \dots < t_n$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mu_{r_1, \dots, r_n}(\Theta, t_1, \dots, t_n)}{\partial t_n} = & \varphi_{r_1, \dots, r_{n,0}}(\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) + \\ & + \sum_{k=3}^N \sum_{|\nu_1|+\dots+|\nu_n|=k} q_{\nu_1, \dots, \nu_n}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \varphi_{r_1, \dots, r_n, \nu_1, \dots, \nu_n}(\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) - \\ & - \sum_{s=1}^p \nu_{ns} \mu_{r_1, \dots, r_{n-e_s}} \dot{m}_s(\Theta, t_n) \\ (|r_1|, \dots, |r_n| = 1, \dots, n_n; |r_1| + \dots + |r_n| = \max(3, n), \dots, n_n). \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь функции $\varphi_{r_1, \dots, r_n, \nu_1, \dots, \nu_n}(\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n)$ определяются формулами (19) с заменой степеней $y_{11}, \dots, y_{1p}, \dots, y_{n1}, \dots, y_{np}$ на $y_{11} - m_1(\Theta, t_1), \dots, y_{1p} - m_p(\Theta, t_1), \dots, y_{n1} - m_1(\Theta, t_n), \dots, y_{np} - m_p(\Theta, t_n)$, а начальные моменты в $q_{\nu_1, \dots, \nu_n}(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ заменяются их выражениями через центральные моменты. Начальные условия для (21) имеют вид:

$$\mu_{r_1, \dots, r_n}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}, t_{n-1}) = \mu_{r_1, \dots, r_{n-1}+r_n}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}). \quad (22)$$

Для двумерного распределения ($n = 2$) необходимо к уравнениям (21) добавить следующее уравнение для ковариационной функции:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} = & A^{K(t_1, t_2)} = \varphi_{30}(\bar{m}_2, \bar{K}_2, \Theta, t_2) + \\ & + \sum_{l=3}^N \sum_{|\nu_1|+|\nu_2|=l} q_{\nu_1, \nu_2}(\alpha_1, \alpha_2) \varphi_{3, \nu_1, \nu_2}(\bar{m}_2, \bar{K}_2, \Theta, t_2), \end{aligned} \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_{3, \nu_1, \nu_2}(\bar{m}_2, \bar{K}_2, \Theta, t_2) = & M_{\Delta y}^{w_2 \nu_{12}} [Y_1 - m(\Theta, t_1)] a(Y_2, \Theta, t_2)^T \\ (|\nu_1|, |\nu_2| = 1, \dots, n_2; |\nu_1| + |\nu_2| = 3, \dots, n_2). \end{aligned} \quad (24)$$

При этом функция φ_{30} определяется (24) при $p_{\nu_1, \nu_2}(y_1, y_2) = p_{0,0}(y_1, y_2) = 1$. Уравнения (21) и (23) для $n = 2$ с начальными условиями $K(\Theta, t_1, t_1) = K(\Theta, t_1)$, $\mu_{r_1, r_2}(\Theta, t_1, t_1) = \mu_{r_1+r_2}(\Theta, t)$ определяют искомое двумерное распределение. Итак, имеем:

Если существует последовательность n -мерных согласованных распределений $T(t)$ в MCmC (1) и согласованное свойство полиномов $\{p_{\nu_1, \dots, \nu_n}, q_{\nu_1, \dots, \nu_n}\}$,

то в основе МНМ для многомерных распределений лежат уравнения (17) при начальных условиях (20) и конечности интегралов (19) (**теорема 3**), а в основе МЦМ — уравнения (21)–(23) (**теорема 4**).

Для определения стационарных распределений по МНМ используются уравнения (15), если заменить дифференцирование по t_n на $\tau_{n-1} = t_n - t_1$, а начальные условия выбрать в виде

$$\alpha_{r_1, \dots, r_n}(\Theta, \tau_1, \dots, \tau_{n-2}, \tau_{n-2}) = \alpha_{r_1, \dots, r_{n-1}+r_n}(\Theta, \tau_1, \dots, \tau_{n-2}).$$

Соответствующие уравнения МЦМ имеют вид (16) и

$$\mu_{r_1, \dots, r_n}(\Theta, \tau_1, \dots, \tau_{n-2}, \tau_{n-2}) = \mu_{r_1, \dots, r_{n-1}+r_n}(\Theta, \tau_1, \dots, \tau_{n-2}).$$

4 Точность и чувствительность методов начальных и центральных моментов

Методы теории чувствительности в инженерной практике широко применяются для приближенного анализа точности СтС со случайными параметрами Θ в предположении малых дисперсий этих параметров по сравнению с их математическими ожиданиями [10, 11]. Сначала, используя теоремы 1 и 2, найдем условные моменты одномерной плотности. Уравнения функций чувствительности первого порядка условных моментов α_r для МНМ получаются путем дифференцирования правых и левых частей уравнений теоремы 1 по Θ . В этом случае, опуская аргументы, получим следующие уравнения для функций чувствительности первого порядка:

$$\nabla^\Theta \dot{\alpha}_r = \nabla^\Theta A^{\alpha_r}, \quad \nabla^\Theta \dot{\alpha}_r(t_0) = 0. \quad (25)$$

Здесь вычисления взятых производных осуществляются по всем входящим переменным $m, K, \alpha_r, \Theta, t$, а коэффициенты вычисляются при $\Theta = m$.

Замечание 6. При дифференцировании α_r по Θ порядок уравнений возрастает пропорционально числу производных.

Аналогично выписываются уравнения для функций чувствительности второго порядка $\nabla^\Theta (\nabla^\Theta)^T \alpha_r(\mu_r)$.

Таким образом, в условиях теоремы 1 уравнения алгоритма чувствительности МНМ имеют вид (25) (**теорема 5**).

В основе **теоремы 6** для чувствительности МЦМ лежат следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \nabla^\Theta \dot{m}_t &= \nabla^\Theta A^m, & \nabla^\Theta(t_0) &= 0; \\ \nabla^\Theta \dot{K}_t &= \nabla^\Theta A^K, & \nabla^\Theta K(t_0) &= 0; \\ \nabla^\Theta \dot{\mu}_r &= \nabla^\Theta A^{\mu_r}, & \nabla^\Theta \mu_r(t_0) &= 0. \end{aligned}$$

Аналогично, на основе теорем 3 и 4 выводятся уравнения чувствительности МНМ и МЦМ для многомерных распределений.

5 Пути сокращения числа уравнений

Как следует из формул (8), основной трудностью практического применения МНМ и МЦМ, особенно для систем высокой размерности, является быстрый рост числа уравнений с увеличением размерности p вектора состояния Y и максимального порядка используемых моментов (см. таблицу).

Зависимость максимального порядка момента от размерности вектора состояния

Максимальный порядок момента N	Размерность вектора состояния p			
	10	20	50	100
2	65	230	1325	5150
4	85	270	1425	5350
6	105	310	1525	5550
8	125	350	1625	5750
10	145	390	1725	5950

Для того чтобы сократить число уравнений для параметров распределений, обычно применяют такое приближение распределения, которое включает смешанные моменты только второго порядка и не зависит от смешанных моментов высших порядков. В таблице показана зависимость числа уравнений для параметров одномерного распределения от p и N . Стока, соответствующая $N = 2$, показывает число уравнений для метода нормальной аппроксимации (МНА). Число уравнений для параметров распределения может быть значительно сокращено с помощью аппроксимации распределений, включающих моменты только второго порядка. В частности, при $p = 10$, $N = 6$ число уравнений сокращается с 8007 до 105. Практически такая аппроксимация может быть получена различными путями. При этом достаточно воспользоваться известными выражениями смешанных центральных моментов через дисперсию и ковариации компонент вектора для нормальных распределений:

$$\mu_{r_1, \dots, r_s} = \begin{cases} \frac{r_1! \cdots r_s!}{2^m m!} \sum k_{h_1 l_1} \cdots k_{h_m l_m} & \text{при } r_1 + \cdots + r_s = 2m; \\ 0 & \text{при } r_1 + \cdots + r_s = 2m + 1, \\ & m = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

где сумма распространена на все различные перестановки $2m$ индексов $h_1, l_1, \dots, h_m, l_m$, из которых r_1 равны 1, r_2 равны 2, ..., r_s , а $s = np$ для n -мерного распределения.

6 Тестовый пример

Как показано в [1, 2], для МСтС вида

$$\dot{Y}_t = -Y_t^3 + Y_t V(\Theta), \quad Y_t(t_0) = Y_0 \quad (26)$$

$(V = V(\Theta))$ — гауссовский белый шум интенсивности $\nu = \nu(\Theta)$) уравнения МНМ для α_r ($r = 1, 2, 3, 4$) и МЦМ для m , K , μ_3 , μ_4 и выражение для одномерной плотности имеют соответственно вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha}_1 &= -\alpha_3; \quad \dot{\alpha}_2 = \nu\alpha_2 - 2\alpha_4; \\ \dot{\alpha}_3 &= 3\nu\alpha_3 - 30(\alpha_2 - 2\alpha_1^2)\alpha_3 - 15\alpha_1\alpha_4 + 90\alpha_1\alpha_2^2 - 180\alpha_3\alpha_2 + 72\alpha_1^5; \\ \dot{\alpha}_4 &= 160\alpha_1^3\alpha_3 + 6\nu\alpha_4 - 60\alpha_2\alpha_4 + 120\alpha_2^3 - 480\alpha_1^4\alpha_2 + 256\alpha_1^6; \\ \dot{m} &= -(m^2 + 3D)m - \mu_3; \quad \dot{D} = \nu(m^2 + D) - 6m^2D - 6m\mu_3 - 2\mu_4; \\ \dot{\mu}_3 &= 3mD(2\nu + 3D) + 3(\nu - 3m^2 - 9D)\mu_3 - 9m\mu_4; \\ \dot{\mu}_4 &= 6D(\nu m^2 + 20D^2) + 12(\nu - 9D)m\mu_3 + 4\mu_3^2 + 6(\nu - 2m^2 - 10D)\mu_4; \\ f_1(y; \Theta, t) &\approx (2\pi D)^{-1/2} e^{-(y-m)^2/(2D)} \left\{ 1 + \frac{c_3 H_3(y-m)}{3!} + \frac{c_4 H_4(y-m)}{4!} \right\}. \end{aligned} \right\} (27)$$

Здесь приняты следующие обозначения и допущения: $H_i(x)$ и $G_i(x)$ — полиномы Эрмита, равные

$$\begin{aligned} H_0(x) &= 1; \quad H_1(x) = \frac{x}{D}; \quad H_2(x) = \frac{x^2 - D}{D^2}; \\ H_3(x) &= \frac{x^3 - 3Dx}{D^3}; \quad H_4(x) = \frac{x^4 - 6Dx^2 + 3D^2}{D^4}; \\ H_5(x) &= \frac{x^5 - 10Dx^3 + 15D^2x}{D^5}; \\ H_6(x) &= \frac{x^6 - 15Dx^4 + 45D^2x^2 - 15D^3}{D^6}; \\ G_0(x) &= 1; \quad G_1(x) = x; \quad G_2(x) = x^2 - D; \quad G_3(x) = x^3 - 3Dx; \\ G_4(x) &= x^4 - 6Dx^2 + 3D^2; \quad G_5(x) = x^5 - 10Dx^3 + 15D^2x; \\ G_6(x) &= x^6 - 15Dx^4 + 45D^2x^2 - 15D^3; \\ q_5(\alpha) &= G_5(\mu) = \mu_5 - 10D\mu_3 = 0; \\ q_6(\alpha) &= G_6(\mu) = \mu_6 - 15D\mu_4 + 30D^3 = 0. \end{aligned}$$

В силу (27) уравнения для первых функций чувствительности ∇m , ∇D , $\nabla \mu_3$, $\nabla \mu_4$ ($\nabla = \partial/\partial\nu$, индекс Θ опущен) имеют следующий вид:

$$\nabla \dot{m} = -3(m^2 + D^2)\nabla m - 3m\nabla D - 3m\nabla \mu_3, \quad \nabla m(t_0) = 0;$$

$$\nabla \dot{D} = m^2 + D^2 + 2(\nu - 6m - 3\mu_3)\nabla m + (\nu - 6m^2)\nabla D - 6m\nabla\mu_3 - 2\nabla\mu_4, \\ \nabla D(t_0) = 0;$$

$$\nabla \dot{\mu}_3 = 6mD + 3\mu_3 + 3D(2\nu + 3D) - 18m\mu_3 - 9D)\nabla m + \\ + [3(2\nu + 3D) + 9D - 27\mu_3]\nabla D + 3(\nu - 3m^2 - 9D)\nabla\mu_3 - 9m\nabla\mu_4, \\ \nabla\mu_3(t_0) = 0;$$

$$\nabla \mu_4 = 6(m^2D + 2m\mu_3 + \mu_4) + [3\nu mD + 3(\nu - 9D)\mu_3 - m\mu_4]\nabla m + \\ + 2[3(\nu m^2 + 20D^2) + 120D^2 - 5\mu_4]\nabla D + 4(3m + 2\mu_3)\nabla\mu_3 + \\ + 6(\nu - 2m^2 - 10D)\nabla\mu_4, \quad \nabla\mu_4(t_0) = 0.$$

Двумерное распределение приближенно описывается формулой:

$$f_2(y_1, y_2; \Theta, t_1, t_2) \approx \left[2\pi \sqrt{k_{11}k_{22} - k_{12}^2} \right]^{-1} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{k_{22}(y_1 - m_1)^2 - 2k_{12}(y_1 - m_1)(y_2 - m_2) + k_{11}(y_2 - m_2)^2}{2(k_{11}k_{22} - k_{12}^2)} \right\} \times \\ \times \left[1 + \sum_{k=3}^4 \sum_{\nu_1+\nu_2=k} \frac{c_{\nu_1\nu_2}}{\nu_1!\nu_2!} H_{\nu_1\nu_2}(y_1 - m_1, y_2 - m_2) \right]. \quad (28)$$

Здесь $m_1 = m(\Theta, t_1)$; $m_2 = m(\Theta, t_2)$; $k_{11} = D(\Theta, t_1)$; $k_{22} = D(\Theta, t_2)$; $c_{\nu_1\nu_2} = G_{\nu_1\nu_2}(\mu)$; $\mu_{30} = \mu_3(\Theta, t_1)$; $\mu_{03} = \mu_3(\Theta, t_2)$; $\mu_{40} = \mu_4(\Theta, t_1)$; $\mu_{04} = \mu_4(\Theta, t_2)$, а моменты $k_{12} = K(\Theta, t_1, t_2)$, $\mu_{21} = \mu_{21}(\Theta, t_1, t_2)$, $\mu_{12} = \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2)$, $\mu_{31} = \mu_{31}(\Theta, t_1, t_2)$, $\mu_{22} = \mu_{22}(\Theta, t_1, t_2)$ и $\mu_{13} = \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2)$ определяются уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} &= \\ &= -3m^2(\Theta, t_2)K(\Theta, t_1, t_2) - 3m(\Theta, t_2)\mu_{12}(\Theta, t_1, t_2) - \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2); \\ \frac{\partial \mu_{21}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} &= -3[m^2(\Theta, t_2) + D(\Theta, t_2)]\mu_{21}(\Theta, t_1, t_2) - \\ &\quad - 6K(\Theta, t_1, t_2)\mu_{12}(\Theta, t_1, t_2) - 3m(\Theta, t_2)\mu_{22}(\Theta, t_1, t_2) + \\ &\quad + 3m(\Theta, t_2)D(\Theta, t_1)D(\Theta, t_2); \\ \frac{\partial \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} &= 2[\nu m(\Theta, t_2) + m(\Theta, t_2)D(\Theta, t_2) - \\ &\quad - 6\mu_3(\Theta, t_2)]K(\Theta, t_1, t_2) + \\ &+ [\nu - 6m^2(\Theta, t_2) - 12D(\Theta, t_2)]\mu_{12}(\Theta, t_1, t_2) - 6m(\Theta, t_2)\mu_{13}(\Theta, t_1, t_2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mu_{31}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} &= 6 [3D(\Theta, t_1) D(\Theta, t_2) + 2K^2(\Theta, t_1, t_2)] K(\Theta, t_1, t_2) - \\
&- 18m(\Theta, t_2) K(\Theta, t_1, t_2) \mu_{21}(\Theta, t_1, t_2) - 9m(\Theta, t_2) D(\Theta, t_1) \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2) - \\
&- 3 [m^2(\Theta, t_2) + D(\Theta, t_2)] \mu_{31}(\Theta, t_1, t_2) - 3D(\Theta, t_1) \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2) + \\
&\quad + \mu_3(\Theta, t_1) \mu_3(\Theta, t_2); \\
\frac{\partial \mu_{22}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} &= 12D(\Theta, t_2) [D(\Theta, t_1) D(\Theta, t_2) + 2K^2(\Theta, t_1, t_2)] + \\
&+ 2 [\nu m(\Theta, t_2) - 8m(\Theta, t_2) D(\Theta, t_2) + \mu_3(\Theta, t_2)] \mu_{21}(\Theta, t_1, t_2) - \\
&- 36m(\Theta, t_2) K(\Theta, t_1, t_2) \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2) + \\
&+ [\nu - 6m^2(\Theta, t_2) - 12D(\Theta, t_2)] \mu_{22}(\Theta, t_1, t_2) - \\
&- 16K(\Theta, t_1, t_2) \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2) + D(\Theta, t_1) [\nu m^2(\Theta, t_2) - \\
&\quad - 6m(\Theta, t_2) \mu_3(\Theta, t_2) - 2\mu_4(\Theta, t_2)]; \\
\frac{\partial \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2)}{\partial t_2} &= \\
&= 3 [\nu m^2(\Theta, t_2) + 30D^2(\Theta, t_2) - 12m(\Theta, t_2) \mu_3(\Theta, t_2) - 5\mu_4(\Theta, t_2)] \times \\
&\times K(\Theta, t_1, t_2) + 3 [2\nu m(\Theta, t_2) - 15m(\Theta, t_2) D(\Theta, t_2) + \mu_3(\Theta, t_2)] \times \\
&\times \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2) + 3 [\nu - 3m^2(\Theta, t_2) - 10D(\Theta, t_2)] \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2); \\
G_{2,3}(\mu) &= G_{1,4}(\mu) = G_{3,2}(\mu) = G_{3,3}(\mu) = G_{2,4}(\mu) = G_{1,5}(\mu) = 0; \\
\mu_{23}(\Theta, t_1, t_2) &= \\
&= D(\Theta, t_1) \mu_3(\Theta, t_2) + 3D(\Theta, t_2) \mu_{21}(\Theta, t_1, t_2) + 6K(\Theta, t_1, t_2) \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2); \\
\mu_{14}(\Theta, t_1, t_2) &= 4\mu_3(\Theta, t_2) K(\Theta, t_1, t_2) + 6D\mu_{12}(\Theta, t_1, t_2); \\
\mu_{32}(\Theta, t_1, t_2) &= \\
&= D(\Theta, t_2) \mu_3(\Theta, t_1) + 3D(\Theta, t_1) \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2) + 6K(\Theta, t_1, t_2) \mu_{21}(\Theta, t_1, t_2); \\
\mu_{33}(\Theta, t_1, t_2) &= \\
&= 3D(\Theta, t_2) \mu_{31}(\Theta, t_1, t_2) + 9K(\Theta, t_1, t_2) \mu_{22}(\Theta, t_1, t_2) + \\
&+ 3D(\Theta, t_1) \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2) - 6 [3D(\Theta, t_1) D(\Theta, t_2) + \\
&\quad + 2K^2(\Theta, t_1, t_2)] K(\Theta, t_1, t_2); \\
\mu_{24}(\Theta, t_1, t_2) &= 6D(\Theta, t_2) \mu_{22}(\Theta, t_1, t_2) + 8K(\Theta, t_1, t_2) \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2) - \\
&- 24D(\Theta, t_2) K^2(\Theta, t_1, t_2) + D(\Theta, t_1) [\mu_4(\Theta, t_2) - 6D^2(\Theta, t_2)], \\
\mu_{15}(\Theta, t_1, t_2) &= 5\mu_4(\Theta, t_2) K(\Theta, t_1, t_2) + 10D(\Theta, t_2) \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2).
\end{aligned}$$

Интегрируя (при фиксированном t_1) полученные обыкновенные дифференциальные уравнения при известных начальных условиях

$$K(\Theta, t_1, t_1) = D(\Theta, t_1); \quad \mu_{21}(\Theta, t_1, t_1) = \mu_{12}(\Theta, t_1, t_1) = \mu_3(\Theta, t_1); \\ \mu_{31}(\Theta, t_1, t_1) = \mu_{22}(\Theta, t_1, t_1) = \mu_{13}(\Theta, t_1, t_1) = \mu_4(\Theta, t_1),$$

найдем все моменты до четвертого порядка двумерного распределения (28) процесса $Y(t)$. Остальные многомерные распределения процесса $Y(t)$ определяются приближенной формулой:

$$f_n(y_1, \dots, y_n; \Theta, t_1, \dots, t_n) \approx \\ \approx [(2\pi)^n |K|]^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (y^T - m^T) K^{-1} (y - m) \right\} \times \\ \times \left[1 + \sum_{k=3}^4 \sum_{|\nu|=k} \frac{c_\nu}{\nu_1! \cdots \nu_n!} H_\nu(y - m) \right], \quad (29)$$

где

$$y = [y_1 \cdots y_n]^T; \quad m = [m(t_1) \cdots m(t_n)]^T; \\ K = \begin{bmatrix} D(\Theta, t_1) & K(\Theta, t_1, t_2) & \cdots & K(\Theta, t_1, t_n) \\ K(\Theta, t_1, t_2) & D(\Theta, t_2) & \ddots & K(\Theta, t_2, t_n) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ K(\Theta, t_1, t_n) & K(\Theta, t_2, t_n) & \cdots & D(\Theta, t_n) \end{bmatrix}; \quad c_\nu = G_\nu(\mu).$$

Замечание 7. При этом моменты $\mu_{\nu_1, \dots, \nu_n} = \mu_{\nu_1, \dots, \nu_n}(\Theta, t_1, \dots, t_n)$, у которых некоторые из индексов ν_1, \dots, ν_n равны нулю, совпадают с моментами распределений меньшей размерности, которые получаются путем вычеркивания всех нулевых индексов и соответствующих аргументов, например: $\mu_{004} = \mu_4(\Theta, t_3)$; $\mu_{0112} = \mu_{112}(\Theta, t_2, t_3, t_4)$; $\mu_{01030} = \mu_{13}(\Theta, t_2, t_4)$.

Моменты трехмерного распределения $\mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_3)$, $\mu_{211}(\Theta, t_1, t_2, t_3)$, $\mu_{121}(\Theta, t_1, t_2, t_3)$ и $\mu_{0112}(\Theta, t_1, t_2, t_3)$, зависящие от всех трех аргументов t_1 , t_2 и t_3 , определяются уравнениями

$$\frac{\partial \mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_3)}{\partial t_3} = -3 [m^2(\Theta, t_3) + D(\Theta, t_3)] \mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_3) - \\ - 3m(\Theta, t_3) \mu_{112}(\Theta, t_1, t_2, t_3) + 3m(\Theta, t_3) D(\Theta, t_3) K(\Theta, t_1, t_2) - \\ - 3K(\Theta, t_1, t_3) \mu_{12}(\Theta, t_2, t_3) - 3K(\Theta, t_2, t_3) \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2);$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mu_{211}(\Theta, t_1, t_2, t_3)}{\partial t_3} = & -12m(\Theta, t_3)K(t_1, t_3)\mu_{111}(t_1, t_2, t_3) - \\
 & - 3[m^2(t_3) + D(\Theta, t_3)]\mu_{211}(\Theta, t_1, t_2, t_3) - 6K(\Theta, t_1, t_3)\mu_{112}(\Theta, t_1, t_2, t_3) + \\
 & + 6D(\Theta, t_1)D(\Theta, t_3)K(\Theta, t_2, t_3) + 12K(\Theta, t_1, t_3)[K(\Theta, t_1, t_3)K(\Theta, t_2, t_3) + \\
 & + D(\Theta, t_3)K(\Theta, t_1, t_2)] + \mu_3(\Theta, t_3)\mu_{21}(\Theta, t_1, t_2) - \\
 & - 6m(\Theta, t_3)K(\Theta, t_2, t_3)\mu_{21}(\Theta, t_1, t_2) - \\
 & - 3m(\Theta, t_3)[D(\Theta, t_1)\mu_{12}(\Theta, t_2, t_3) + 2K(\Theta, t_1, t_2)\mu_{12}(\Theta, t_1, t_3)] - \\
 & - 3K(\Theta, t_2, t_3)\mu_{22}(\Theta, t_1, t_3) - 2K(\Theta, t_1, t_2)\mu_{13}(\Theta, t_1, t_3) - \\
 & - D(\Theta, t_1)\mu_{13}(\Theta, t_2, t_3); \\
 \frac{\partial \mu_{121}(\Theta, t_1, t_2, t_3)}{\partial t_3} = & -12m(\Theta, t_3)K(\Theta, t_2, t_3)\mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_3) - \\
 & - 3[m^2(\Theta, t_3) + D(\Theta, t_3)]\mu_{121}(\Theta, t_1, t_2, t_3) - 6K(\Theta, t_2, t_3)\mu_{112}(\Theta, t_1, t_2, t_3) + \\
 & + 6D(\Theta, t_3)[D(\Theta, t_2)K(\Theta, t_1, t_3) + 2K(\Theta, t_1, t_2)K(\Theta, t_2, t_3)] + \\
 & + 12K(\Theta, t_1, t_3)K^2(\Theta, t_2, t_3) - 6m(\Theta, t_3)K(\Theta, t_1, t_3)\mu_{21}(\Theta, t_2, t_3) + \\
 & + \mu_3(\Theta, t_2)\mu_{12}(\Theta, t_1, t_2) - 3m(\Theta, t_3)D(\Theta, t_2)\mu_{12}(\Theta, t_1, t_3) - \\
 & - 6m(\Theta, t_3)K(\Theta, t_1, t_2)\mu_{12}(\Theta, t_2, t_3) - 3K(\Theta, t_1, t_3)\mu_{22}(\Theta, t_2, t_3) - \\
 & - D(\Theta, t_2)\mu_{13}(\Theta, t_1, t_3) - 2K(\Theta, t_1, t_2)\mu_{13}(\Theta, t_2, t_3); \\
 \frac{\partial \mu_{112}(\Theta, t_1, t_2, t_3)}{\partial t_3} = & \\
 & = 2[\nu m(\Theta, t_3) - 6m(\Theta, t_3)D(\Theta, t_3) + \mu_3(\Theta, t_3)]\mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_3) + \\
 & + [\nu - 6m^2(\Theta, t_3) - 12D(\Theta, t_3)]\mu_{112}(\Theta, t_1, t_2, t_3) + \nu m^2(\Theta, t_3)K(\Theta, t_1, t_2) + \\
 & + 12[K(\Theta, t_1, t_2)D(\Theta, t_3) + 4K(\Theta, t_1, t_3)K(\Theta, t_2, t_3)]D(\Theta, t_3) - \\
 & - 2K(\Theta, t_1, t_2)\mu_4(\Theta, t_3) - 6m(\Theta, t_3)[3K(\Theta, t_2, t_3)\mu_{12}(\Theta, t_1, t_3) + \\
 & + 3K(\Theta, t_1, t_3)\mu_{12}(\Theta, t_2, t_3) + K(\Theta, t_1, t_2)\mu_3(\Theta, t_3)] - \\
 & - 8[K(\Theta, t_1, t_3)\mu_{13}(\Theta, t_2, t_3) + K(\Theta, t_2, t_3)\mu_{13}(\Theta, t_1, t_3)]
 \end{aligned}$$

и начальными условиями

$$\begin{aligned}
 \mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_3) &= \mu_{12}(\Theta, t_1, t_2); \quad \mu_{211}(\Theta, t_1, t_2, t_3) = \mu_{22}(\Theta, t_1, t_2); \\
 \mu_{121}(\Theta, t_1, t_2, t_3) &= \mu_{112}(\Theta, t_1, t_2, t_3) = \mu_{13}(\Theta, t_1, t_2).
 \end{aligned}$$

Единственный момент четвертого порядка, зависящий от четырех переменных t_1, t_2, t_3 и t_4 , определяется соответствующим уравнением

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mu_{1111}(\Theta, t_1, t_2, t_3, t_4)}{\partial t_4} = & -3 [m^2(\Theta, t_4) + D(\Theta, t_4)] \mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_3, t_4) + \\
& + 6 [K(\Theta, t_1, t_2)K(\Theta, t_3, t_4) + K(\Theta, t_1, t_3)K(\Theta, t_2, t_4) + \\
& + K(\Theta, t_1, t_4)K(\Theta, t_2, t_3)] D(\Theta, t_4) + 12K(\Theta, t_1, t_4)K(\Theta, t_2, t_4)K(\Theta, t_3, t_4) - \\
& - 3m(\Theta, t_4)[K(\Theta, t_1, t_2)\mu_{12}(\Theta, t_3, t_4) + K(\Theta, t_1, t_3)\mu_{12}(\Theta, t_2, t_4) + \\
& + K(\Theta, t_2, t_3)\mu_{12}(\Theta, t_1, t_4)] - K(\Theta, t_1, t_2)\mu_{13}(\Theta, t_3, t_4) - \\
& - K(\Theta, t_1, t_3)\mu_{13}(\Theta, t_2, t_4) - K(\Theta, t_2, t_3)\mu_{13}(\Theta, t_1, t_4) + \\
& + \mu_3(\Theta, t_4)\mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_3) - 6m(\Theta, t_4)[K(\Theta, t_3, t_4)\mu_{111}(\Theta, t_1, t_2, t_4) + \\
& + K(\Theta, t_2, t_4)\mu_{111}(\Theta, t_1, t_3, t_4) + \\
& + K(\Theta, t_1, t_4)\mu_{111}(\Theta, t_2, t_3, t_4)] - 3[K(\Theta, t_3, t_4)\mu_{112}(\Theta, t_1, t_2, t_4) + \\
& + K(\Theta, t_2, t_4)\mu_{112}(\Theta, t_1, t_3, t_4) + K(\Theta, t_1, t_4)\mu_{112}(\Theta, t_2, t_3, t_4)]
\end{aligned}$$

и начальным условием $\mu_{1111}(\Theta, t_1, t_2, t_3, t_4) = \mu_{112}(\Theta, t_1, t_2, t_3)$. Так как моменты не выше четвертого порядка не могут зависеть больше чем от четырех аргументов из t_1, \dots, t_n , то после интегрирования последнего уравнения приближенная формула (29) определит все многомерные распределения процесса $Y(t)$.

Замечание 8. Как показано в [1, 2], точные рекуррентные уравнения для одномерных начальных моментов для (26) имеют следующий вид:

$$\dot{\alpha}_{\kappa t} = -\kappa \alpha_{\kappa+2,t} + \frac{\kappa}{2} \kappa(\kappa-1) \alpha_{\kappa,t} \quad (\kappa = 1, 2, \dots). \quad (30)$$

Уравнение (30) было использовано для оценки точности МОР на основе вероятностных моментов до 4-го и 5-го порядков включительно по формулам из [4, 5]. Для оценки качества МСтС при гауссовских Θ выбрана условная функция потерь ρ , допускающая квадратическую аппроксимацию:

$$\rho = \rho(\Theta) = \rho(m^\Theta) + \sum_{i=1}^{p^\Theta} \rho'_i(m^\Theta) \Theta_i^0 + \sum_{i,j=1}^{p^\Theta} \rho''_{ij}(m^\Theta) \Theta_i^0 \Theta_j^0,$$

а также показатель ε

$$\varepsilon = \varepsilon_2^{1/4}, \quad \varepsilon_2 = M^N [\rho(\Theta)]^2 - \rho(m^\Theta)^2,$$

где

$$\begin{aligned}
M^N [\rho(\Theta)]^2 = & \rho(m^\Theta)^2 + \rho'(m^\Theta)^T K^\Theta \rho'(m^\Theta) + \\
& + 2\rho(m^\Theta) \text{tr} [\rho''(m^\Theta) K^\Theta] + \left\{ \text{tr} [\rho''(m^\Theta) K^\Theta] \right\}^2 + 2\text{tr} [\rho''(m^\Theta) K^\Theta]^2.
\end{aligned}$$

Как показывают расчеты, относительная точность МЦМ/МНА составляет менее 12% и 2% при $m^\Theta / \sqrt{D^\Theta} = 1$ и 0,5 соответственно.

7 Заключение

Для нелинейных дифференциальных СтС с винеровскими и пуассоновскими шумами, понимаемых в смысле Ито, в том числе и на многообразиях, разработаны МНМ и МЦМ для аналитического моделирования одно- и многомерных распределений. Получены уравнения точности и чувствительности начальных и центральных методов. Двумерные распределения и их разложения применяются для оценки нестационарных характеристик надежности и безопасности, а трех- и четырехмерные — для оценки вероятностей редких событий.

Результаты положены в основу модуля инstrumentального символьного программного обеспечения в среде MATLAB-MAPLE.

В качестве дальнейших обобщений можно рассмотреть дискретные и непрерывные дискретные системы на многообразиях. Значительный интерес представляют стационарные и приводимые к стационарным процессы в стохастических системах и в первую очередь в системах, допускающих распределения с инвариантной мерой.

Литература

1. Пугачев В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с. (Англ. пер. Pugachev V. S., Siniatsyn I. N. Stochastic differential systems. Analysis and filtering. — Chichester, NY, USA: John Wiley, 1987. 549 p.)
2. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. [Англ. пер. Stochastic systems. Theory and applications. — Singapore: World Scientific, 2001. 908 p.]
3. Синицын И. Н. Параметрическое статистическое и аналитическое моделирование распределений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 2. С. 4–16.
4. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование распределений методом ортогональных разложений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 3. С. 17–24.
5. Синицын И. Н. Применение ортогональных разложений для аналитического моделирования многомерных распределений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 4–23.
6. ГОСТ 23743-88. Изделия авиационной техники. Номенклатура показателей безопасности полета, надежности, контролепригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности.
7. Болотин В. В. Теория надежности машин // Машиностроение: Энциклопедия. Т. IV-3. Надежность машин. — М.: Машиностроение, 1998. С. 11–66.
8. Александровская Л. Н., Аронов И. З., Круглов В. И. и др. Безопасность и надежность технических систем. — М.: Университетская книга, Логос, 2008. 376 с.
9. Ватанабэ С., Икэда Н. Стохастические дифференциальные уравнения и диффузионные процессы / Пер. с англ. — М.: Наука, 1986. 448 с. (Watanabe S, Ikeda N.

- Stochastic differential equations and diffusion processes. — Amsterdam – Oxford – New York: North-Holland Publishing Co.; Tokyo: Kodansha Ltd., 1981. 476 p.)
10. Евланов А. Г., Константинов В. М. Системы со случайными параметрами. — М.: Наука, 1976. 568 с.
 11. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — М.: Наука, 1987. 712 с.

Поступила в редакцию 12.08.15

MOMENTS METHODS FOR ANALYTICAL MODELING OF STOCHASTIC SYSTEMS ON MANIFOLDS

I. N. Sinitsyn

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

Abstract: Problems of accuracy and sensitivity estimation for algorithms of analytical modeling methods (AMM) based on one- and multidimensional initial moments methods (IMM) and central moments method (CMM) in stochastic systems on manifolds (MStS) with Wiener and Poisson noises are considered. For typical reliability and security problems accuracy and sensitivity, equations for AMM are given. Problems of reduction of equations for IMM and CMM are discussed. The results are the basis of symbolic software tools in MATLAB-MAPLE. A test example for scalar MStS with cubic nonlinearity and multiplicative Gaussian noise is given. Some generalizations are presented.

Keywords: accuracy IMM and CMM equations; analytical modeling method (AMM); central moments method (CMM); Hermite polynomials; initial moments method (IMM); one- and multidimensional distribution density; sensitivity IMM and CMM equations; stochastic system on manifold (MStS)

DOI: 10.14357/08696527150302

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-07-02244).

References

1. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester, NY: Jonh Wiley. 549 p.
2. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.

3. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Parametric statistical and analytical modeling of distributions in nonlinear stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 7(2):4–16.
4. Sinitsyn, I. N. 2015. Analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy metodom ortogonal'nykh razlozheniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Analytical modeling in stochastic systems on manifolds based on orthogonal expansions]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 9(3):17–24.
5. Sinitsyn, I. N. 2015. Primenenie ortogonal'nykh razlozheniy dlya analiticheskogo modelirovaniya mnogomernykh raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Applications of orthogonal expansions for analytical modeling of multidimensional densities in stochastic systems on manifolds]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):4–23.
6. GOST 23743-88. Izdelya aviationsionnoy tekhniki. Nomenklatura pokazateley bezopasnosti poleta, nadezhnosti, kontroleprigodnosti, ekspluatatsionnoy i remontnoy tekhnologichnosti [Aircraft products. Nomenclature of flight safety, reliability, testability, operational and repair manufacturability].
7. Bolotin, V. V. 1998. Teoriya nadezhnosti mashin [Theory of machine reliability]. *Mashinostroenie. Entsiklopetsiya* [Mechanical engineering Encyclopedia]. Nadezhnost' mashin [Reliability of machines]. Moscow: Mashinostroenie. IV-3:11–66.
8. Aleksandrovskaia, L. N., I. Z. Aronov, V. I. Kruglov, et al. 2008. *Bezopasnost' i nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Security and reliability of technical systems]. Moscow: Universitetskaya Kniga, Logos. 376 p.
9. Watanabe, S., and N. Ikeda. 1981. *Stochastic differential equations and diffusion processes*. Amsterdam—Oxford—New York: North-Holland Publishing Co.; Tokyo: Kodansha Ltd. 476 p.
10. Evlanov, A. G., and V. M. Konstantinov. 1976. *Sistemy so slozhnymi parametrami* [Systems with random parameters]. Moscow: Nauka. 568 p.
11. Krasovskii, A. A., ed. 1987. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook for automatic control]. Moscow: Nauka. 712 p.

Received August 12, 2015

Contributor

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

МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ СТАЦИОНАРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЧЕРЕДИ В ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ С УПОРЯДОЧЕННЫМ ВХОДОМ КОНЕЧНОЙ ЕМКОСТИ*

И. С. Зарядов¹, Л. А. Мейханаджян², Т. А. Милованова³, Р. В. Разумчик⁴

Аннотация: Рассматривается система массового обслуживания (СМО) с упорядоченным входом и двумя приборами. Перед каждым прибором имеется очередь конечной емкости. Емкости очередей различны. В систему поступает пуассоновский поток постоянной интенсивности. Заявка при поступлении попадает на прибор с номером 1 или, если тот занят, занимает место в очереди перед ним. Если же в момент поступления заявки в очереди к прибору с номером 1 нет свободных мест, заявка поступает на прибор с номером 2 или, если тот занят, занимает место в очереди перед ним. Заявка, заставшая в момент поступления обе очереди заполненными, теряется и в систему не возвращается. Времена обслуживания заявок на приборах имеют экспоненциальное распределение с одним и тем же параметром. Предложен новый метод нахождения стационарного распределения.

Ключевые слова: система массового обслуживания; специальные функции; двумерная цепь Маркова; совместное стационарное распределение

DOI: 10.14357/08696527150303

1 Введение

В данной работе исследуются стационарные характеристики СМО с упорядоченным входом, находящие применение при моделировании процессов в промышленном строительстве и инфотелекоммуникационных системах. В достаточно общем случае СМО с упорядоченным входом можно описать следующим образом. В СМО имеется K приборов, пронумерованных числами от 1 до K . Перед каждым прибором есть собственная очередь конечной емкости. Поступающая в систему заявка сначала пытается занять прибор с номером 1 и, если он свободен, начинает на нем обслуживаться. В противном случае поступающая

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-07-03007 и 15-07-03406).

¹Российский университет дружбы народов, izaryadov@sci.pfu.edu.ru

²Российский университет дружбы народов, lameykhhanadzhyan@gmail.com

³Российский университет дружбы народов, tmilovanova77@mail.ru

⁴Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Российский университет дружбы народов, rrazumchik@gmail.com

заявка занимает одно место в очереди перед прибором номер 1, если в очереди есть хотя бы одно свободное место. Если же поступающая в систему заявка застает прибор с номером 1 занятым и очередь перед этим прибором полностью заполнена, она «переходит» к прибору номер 2. Если прибор номер 2 свободен, заявка встает на него; если же прибор занят и в очереди перед прибором номер 2 есть свободное место, то заявка встает в эту очередь. В случае, если прибор номер 2 и очередь перед ним оказываются полностью заполненными, поступающая заявка пытается поступить на прибор номер 3. Этот процесс продолжается до тех пор, пока поступающая в систему заявка либо не найдет свободное место (на одном из приборов или в одной из очередей), либо обнаружит, что система полностью заполнена, и уйдет из нее, так и не обслужившись (т. е. будет потеряна). Исследованию подобных систем посвящено достаточно много работ (см., например, [1–20]). Основными характеристиками, которым уделяется внимание, в различных постановках являются вероятности переполнения очередей и потерь, совместное стационарное распределение очередей.

В настоящей работе ставится и решается задача нахождения рекуррентного метода расчета совместного стационарного распределения очередей, пожалуй, в простейшем, однако недостаточно разработанном случае пуассоновского входящего потока постоянной интенсивности и двух приборов ($K = 2$), обслуживающих заявки экспоненциальное время с одинаковыми параметрами, а емкости очередей перед каждым из приборов различны. Краткий обзор результатов по данной постановке можно найти в [21]¹. Идея предлагаемого метода применялась, по-видимому, впервые в работе [22], а затем в [23], но для анализа других систем обслуживания. Основным аппаратом исследования является метод производящих функций, однако также используются некоторые результаты теории специальных функций (для ультрасферических многочленов).

Работа организована следующим образом. В следующем разделе приводится описание системы. В разд. 3 формулируется основной результат работы, а затем в разд. 4 приводятся некоторые результаты численных расчетов. В заключении вкратце обсуждаются полученные результаты и направления дальнейших исследований.

2 Описание системы

Рассмотрим СМО, в которой имеется два обслуживающих прибора, про- numerированных числами 1 и 2. Перед каждым прибором имеется собственная очередь. Число мест в очереди перед прибором 1 равно M , а перед прибором 2 равно N . Далее будем считать, что $N \geq M$. Поступающая в систему заявка сначала пытается занять прибор с номером 1 и, если он свободен, начинает на нем обслуживаться. В противном случае поступающая заявка занимает одно место

¹Там же отмечено, что стационарные вероятности в рассматриваемом случае не могут быть найдены рекуррентным образом.

в очереди перед прибором номер 1, если в очереди есть хотя бы одно свободное место. Если же поступающая в систему заявка застает прибор с номером 1 занятым и очередь перед этим прибором полностью заполнена, она «переходит» к прибору номер 2. Если прибор номер 2 свободен, заявка встает на него; если же прибор занят и в очереди перед прибором номер 2 есть свободное место, то заявка встает в эту очередь. В случае, если прибор номер 2 и очередь перед ним оказываются полностью заполненными, поступающая заявка теряется. Дисциплина обслуживания заявок в каждой очереди — в порядке поступления. Прерывание обслуживания не допускается.

Марковский процесс, описывающий функционирование рассматриваемой системы, является неприводимым, определен на конечном множестве состояний и, следовательно, является эргодическим.

Обозначим через p_{ij} стационарную вероятность того, что на приборе 1 и в очереди перед ним имеется i , $i = \overline{0, M}$, заявок, а на приборе 2 и в очереди перед ним имеется j , $j = \overline{0, N}$, заявок. Очевидно, p_{00} является вероятностью простой системы.

Исходя из принципа глобального баланса, нетрудно показать, что стационарные вероятности удовлетворяют следующей системе уравнений равновесия:

$$\lambda p_{00} = \mu p_{10} + \mu p_{01}; \quad (1)$$

$$(\lambda + \mu)p_{M0} = \lambda p_{M-1,0} + \mu p_{M1}, \quad i = M, \quad j = 0; \quad (2)$$

$$2\mu p_{M,N} = \lambda p_{M-1,N} + \lambda p_{M,N-1}, \quad i = M, \quad j = N; \quad (3)$$

$$(\mu + \lambda)p_{0N} = \mu p_{1,N}, \quad i = 0, \quad j = N; \quad (4)$$

$$(\lambda + 2\mu)p_{Mj} = \lambda p_{M-1,j} + \lambda p_{M,j-1} + \mu p_{M,j+1}, \quad i = 0, \quad j = \overline{1, N-1}; \quad (5)$$

$$(\lambda + \mu)p_{0j} = \mu p_{1j} + \mu p_{0,j+1}, \quad i = 0, \quad j = \overline{1, N-1}; \quad (6)$$

$$(\lambda + 2\mu)p_{iN} = \lambda p_{i-1,N} + \mu p_{i+1,N}, \quad i = \overline{1, M-1}, \quad j = N; \quad (7)$$

$$(\lambda + \mu)p_{i0} = \lambda p_{i-1,0} + \mu p_{i+1,0} + \mu p_{i,1}, \quad i = \overline{1, M-1}, \quad j = 0; \quad (8)$$

$$(\lambda + 2\mu)p_{ij} = \lambda p_{i-1,j} + \mu p_{i+1,j} + \mu p_{i,j+1}, \quad i = \overline{1, M-1}, \quad j = \overline{1, N-1}, \quad (9)$$

с условием нормировки

$$\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N p_{ij} = 1.$$

3 Алгоритм расчета совместного стационарного распределения

Введем двойную производящую функцию ($\Pi\Phi$)

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N p_{ij} u^i v^j, \quad 0 \leq u \leq 1, \quad 0 < v \leq 1.$$

Умножая уравнения (1)–(9) на $u^i v^j$, суммируя по всем возможным значениям i и j и приводя подобные слагаемые, получаем

$$\begin{aligned} & - [\lambda u^2 v - ((\lambda + 2\mu)v - \mu)u + \mu v] P(u, v) = \lambda u^{M+1} v^{N+1} (1 - v) p_{MN} + \\ & + \mu v(u - 1) \sum_{j=0}^N p_{0,j} v^j + \mu u(v - 1) \sum_{i=0}^M p_{i,0} u^i + \lambda u^{M+1} v(v - u) \sum_{j=0}^N p_{M,j} v^j. \quad (10) \end{aligned}$$

Выражение в квадратных скобках левой части (10) представляет собой многочлен второй степени относительно u , корни которого $u_1 = u_1(v)$ и $u_2 = u_2(v)$ имеют вид:

$$u_{1,2} = \frac{(\lambda + 2\mu)v - \mu \mp \sqrt{((\lambda + 2\mu)v - \mu)^2 - 4\lambda\mu v^2}}{2\lambda v}.$$

Нетрудно видеть, что $u_2(v) > 1$ и $0 < u_1(v) \leq 1$ при $0 < v \leq 1$. Так как левая часть (10) обращается в нуль в точках $(u_1(v), v)$ и $(u_2(v), v)$, то правая часть (10) тоже должна обращаться в нуль в этих точках. Отсюда имеем два уравнения:

$$\begin{aligned} & \lambda u_1^{M+1} v^{N+1} (1 - v) p_{MN} + \mu v(u_1 - 1) \sum_{j=0}^N p_{0,j} v^j + \\ & + \mu u_1(v - 1) \sum_{i=0}^M p_{i,0} u_1^i + \lambda u_1^{M+1} v(v - u_1) \sum_{j=0}^N p_{M,j} v^j = 0; \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \lambda u_2^{M+1} v^{N+1} (1 - v) p_{MN} + \mu v(u_2 - 1) \sum_{j=0}^N p_{0,j} v^j + \\ & + \mu u_2(v - 1) \sum_{i=0}^M p_{i,0} u_2^i + \lambda u_2^{M+1} v(v - u_2) \sum_{j=0}^N p_{M,j} v^j = 0. \quad (12) \end{aligned}$$

Исключим сначала из (11) слагаемое с p_{MN} . Выражая его из (11) и подставляя в (12), после приведения подобных слагаемых, вспоминая, что $u_1 u_2 = \mu/\lambda$, получим

$$\begin{aligned} & \lambda \mu \left(\frac{u_2^{M+1} - u_1^{M+1}}{u_2 - u_1} - \frac{\mu}{\lambda} \frac{u_2^M - u_1^M}{u_2 - u_1} \right) \sum_{j=0}^N p_{0,j} v^{j+1} - \\ & - \mu^2 (v - 1) \sum_{i=0}^M p_{i,0} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^i \left(\frac{u_2^{M-i} - u_1^{M-i}}{u_2 - u_1} \right) - \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^{M+1} \lambda^2 \sum_{j=0}^N p_{M,j} v^{j+1} = 0. \quad (13) \end{aligned}$$

Вернемся к (11) и исключим теперь слагаемое с $\sum_{j=0}^N p_{M,j} v^j$. Выражая его из (11) и подставляя в (12), после несложных, но утомительных выкладок, которые здесь не приводятся, приходим к уравнению:

$$\begin{aligned}
 & (1-v)\lambda^2 p_{MN} v^{N+1} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^{M+1} + \lambda\mu \left(v \left[\frac{u_2^{M+1} - u_1^{M+1}}{u_2 - u_1} + \frac{\mu}{\lambda} \left[\frac{u_1^M - u_2^M}{u_2 - u_1} \right] \right] + \right. \\
 & \left. + \frac{\mu}{\lambda} \left[\frac{u_2^{M+1} - u_1^{M+1}}{u_2 - u_1} \right] + \frac{u_1^{M+2} - u_2^{M+2}}{u_2 - u_1} \right) \sum_{j=0}^N p_{0,j} v^{j+1} - \\
 & - \mu^2 (v-1) v \sum_{i=0}^M p_{i,0} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^i \left(\frac{u_2^{M-i} - u_1^{M-i}}{u_2 - u_1} \right) + \\
 & + \mu^2 (v-1) \sum_{i=0}^M p_{i,0} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^i \left(\frac{u_2^{M+1-i} - u_1^{M+1-i}}{u_2 - u_1} \right) = 0. \quad (14)
 \end{aligned}$$

Из вида корней $u_{1,2}(v)$ вытекает следующее представление:

$$u_2(v) = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \frac{(x + \sqrt{x^2 - 4})}{2}; \quad u_1(v) = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \frac{(x - \sqrt{x^2 - 4})}{2},$$

где

$$x = x(v) = \frac{(\lambda + 2\mu)v - \mu}{v\sqrt{\lambda\mu}}.$$

Обратимся к многочленам Чебышёва 2-го рода, которые будем обозначать через $U_n(z)$. Как известно (см., например, [24]), для функции $U_n(z)$ справедливо представление:

$$U_n(z) = \frac{(z + \sqrt{z^2 - 1})^{n+1} - (z - \sqrt{z^2 - 1})^{n+1}}{2\sqrt{z^2 - 1}}.$$

Тогда нетрудно видеть, что отношение $(u_2^i - u_1^i)/(u_2 - u_1)$ можно выразить через функцию $U_n(v)$ следующим образом:

$$\frac{u_2^i - u_1^i}{u_2 - u_1} = \frac{u_2(v)^i - u_1(v)^i}{u_2(v) - u_1(v)} = \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{i-1} U_{i-1} \left(\frac{x}{2} \right).$$

Раскладывая теперь $U_{i-1}(x/2)$ в ряд Маклорена, получаем, что

$$\frac{u_2^i - u_1^i}{u_2 - u_1} = \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{i-1} \sum_{m=0}^{i-1} \frac{U_{i-1}^{(m)}(0)}{2^m m!} \left(\frac{(\lambda + 2\mu)v - \mu}{\sqrt{\lambda\mu}v} \right)^m,$$

где через $U_n^{(m)}(0)$ обозначена m -я производная функции $U_n(z)$ в точке $z = 0$. Используя теперь связь между производными многочленов Чебышёва второго

рода и многочленами Гегенбауэра $C_n^m(x)$, задаваемую равенством (см., например, [25, с. 186])

$$U_n^{(m)}(z) = 2^m m! C_{n-m}^{m+1}(z),$$

находим, что $\forall i \geq 1$ справедливо следующее разложение:

$$\begin{aligned} \frac{u_2^i - u_1^i}{u_2 - u_1} &= \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{i-1} \sum_{m=0}^{i-1} C_{i-m-1}^{m+1}(0) ((\lambda + 2\mu)v - \mu)^m (\sqrt{\lambda\mu}v)^{-m} = \\ &= \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{i-1} \sum_{m=0}^{i-1} C_{i-m-1}^{m+1}(0) \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\sqrt{\lambda\mu}} \right)^m \sum_{j=0}^m \binom{m}{j} (-1)^j \left(\frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \right)^j v^{-j}, \end{aligned}$$

которое после смены пределов суммирования можно переписать в виде

$$\frac{u_2^i - u_1^i}{u_2 - u_1} = \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{i-1} \sum_{j=0}^{i-1} c(i, j) v^{-j}, \quad i \geq 1, \quad (15)$$

где коэффициенты $c(i, j)$ рассчитываются по формуле

$$c(i, j) = (-1)^j \left(\frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \right)^j \left[\sum_{m=j}^{i-1} C_{i-m-1}^{m+1}(0) \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\sqrt{\lambda\mu}} \right)^m \binom{m}{j} \right].$$

Важно отметить, что дробь, стоящая слева в (15), есть не что иное, как многочлен целой степени от v .

Рассмотрим подробнее уравнение (13) и воспользуемся представлением (15) для входящих в него дробей вида $(u_2^i - u_1^i)/(u_2 - u_1)$. Опуская промежуточные выкладки, получаем, что коэффициент при первом слагаемом можно переписать в виде

$$\lambda\mu \left(\frac{u_2^{M+1} - u_1^{M+1}}{u_2 - u_1} - \frac{\mu}{\lambda} \frac{u_2^M - u_1^M}{u_2 - u_1} \right) = \lambda\mu \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^M \sum_{j=0}^M r_1(j) v^{-j},$$

где

$$r_1(j) = c(M+1, j) - \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} c(M, j), \quad j = \overline{0, M-1}, \quad r_1(M) = c(M+1, M).$$

Теперь рассмотрим второе слагаемое в (13) и опять воспользуемся представлением (15). Заметим, что если $i = M$, то один из сомножителей, стоящих в сумме, будет нулевым. Поэтому суммирование будем производить от 0 до $M-1$. Имеем

$$\begin{aligned}
 & -\mu^2(v-1) \sum_{i=0}^{M-1} p_{i,0} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^i \left(\frac{u_2^{M-i} - u_1^{M-i}}{u_2 - u_1} \right) = \\
 & = -\mu^2(v-1) \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{M-1-j} p_{i,0} \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M+i-1} c(M-i,j) v^{-j} = \\
 & = -\mu^2(v-1) \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} r_2(j) v^{-j},
 \end{aligned}$$

где

$$r_2(j) = \sum_{i=0}^{M-1-j} p_{i,0} \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^i c(M-i,j).$$

После произведенных преобразований уравнение (13) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned}
 & \lambda \mu \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^M \left(\sum_{j=0}^M r_1(j) v^{-j} \right) \sum_{j=0}^N p_{0,j} v^{j+1} - \\
 & - \mu^2(v-1) \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} r_2(j) v^{-j} - \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^{M+1} \lambda^2 \sum_{j=0}^N p_{M,j} v^{j+1} = 0,
 \end{aligned}$$

который еще можно упростить, перемножая многочлены в первом слагаемом и сокращая на $\mu(\sqrt{\mu/\lambda})^{M-1}$. После этого уравнение (13) примет вид:

$$\begin{aligned}
 & \sqrt{\mu\lambda} \sum_{j=1}^M v^{-j+1} \sum_{k=0}^{M-j} p_{0,k} r_1(k+j) + \sqrt{\mu\lambda} \sum_{j=0}^N v^{j+1} \sum_{k=j}^{\min(M+j,N)} p_{0,k} r_1(k-j) - \\
 & - \mu \sum_{j=0}^{M-1} r_2(j) v^{-(j-1)} + \mu \sum_{j=0}^{M-1} r_2(j) v^{-j} - \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M+1} \lambda \sum_{j=0}^N p_{M,j} v^{j+1} = 0. \quad (16)
 \end{aligned}$$

Переменная v в этом уравнении принимает только положительные значения в интервале $([\mu(\lambda + 2\mu) - \sqrt{4\lambda\mu^3}] / [\lambda^2 + 4\mu^2], [\mu(\lambda + 2\mu) + \sqrt{4\lambda\mu^3}] / [\lambda^2 + 4\mu^2])$, и только при этих значениях корни $u_{1,2}(v)$ являются действительными числами. Поскольку многочлен в (16) равен нулю при всех значениях v из указанного интервала, то коэффициенты при каждой степени v в (16) должны быть равны нулю. Отсюда получаем следующую систему уравнений:

$$\mu r_2(M-1) + \sqrt{\mu\lambda} p_{00} r_1(M) = 0; \quad (17)$$

$$\mu r_2(j) + \sqrt{\mu\lambda} \sum_{k=0}^{M-1-j} p_{0k} r_1(k+1+j) - \mu r_2(j+1) = 0, \quad j = \overline{0, M-2}; \quad (18)$$

$$\sqrt{\mu\lambda} \sum_{k=0}^M p_{0k} r_1(k) - \mu r_2(0) - \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M+1} \lambda p_{M,0} = 0; \quad (19)$$

$$\sqrt{\mu\lambda} \sum_{k=j}^{\min(M+j,N)} p_{0,k} r_1(k-j) - \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M+1} \lambda p_{M,j} = 0, \quad j = \overline{1, N}. \quad (20)$$

Заметим, что, складывая все уравнения (17)–(20), можно получить выражение для расчета вероятности простой системы:

$$p_{00} = \left(\frac{\sqrt{\rho}^M (1-\rho)}{1-\rho^{M+1}} - \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=j}^{\min(M+j,N)} p_{0,k} r_1(k-j) + \sum_{j=0}^{M-2} \sum_{k=1}^{M-1-j} p_{0,k} r_1(k+1+j) + \sum_{k=1}^M p_{0,k} r_1(k) \right) \right) / \sum_{k=0}^M r_1(k). \quad (21)$$

Обратимся теперь к уравнению (14). Рассмотрим подробнее коэффициент при втором слагаемом и опять воспользуемся представлением (15) для входящих в него дробей вида $(u_2^i - u_1^i)/(u_2 - u_1)$. Опуская промежуточные выкладки, которые не представляют принципиального интереса, приведем окончательное выражение:

$$\begin{aligned} \lambda\mu \left(v \left[\frac{u_2^{M+1} - u_1^{M+1}}{u_2 - u_1} + \frac{\mu}{\lambda} \left[\frac{u_1^M - u_2^M}{u_2 - u_1} \right] \right] + \frac{\mu}{\lambda} \left[\frac{u_2^{M+1} - u_1^{M+1}}{u_2 - u_1} \right] + \right. \\ \left. + \frac{u_1^{M+2} - u_2^{M+2}}{u_2 - u_1} \right) = \lambda\mu \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^M \left[r_1(0)v + \sum_{j=0}^{M+1} q_1(j)v^{-j} \right], \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} q_1(j) = c(M+1, j+1) - \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} c(M, j+1) + \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^2 c(M+1, j) - \\ - \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} c(M+2, j), \quad j = \overline{0, M-2}; \end{aligned}$$

$$q_1(M-1) = c(M+1, M) + \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^2 c(M+1, M-1) - \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} c(M+2, M-1);$$

$$q_1(M) = \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^2 c(M+1, M) - \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} c(M+2, M);$$

$$q_1(M+1) = -\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} c(M+2, M+1).$$

Теперь рассмотрим последнее слагаемое в (14) и преобразуем его с учетом представления (15). Запишем

$$\begin{aligned} \mu^2(v-1) \sum_{i=0}^M p_{i,0} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^i \left(\frac{u_2^{M+1-i} - u_1^{M+1-i}}{u_2 - u_1} \right) &= \\ = \mu^2(v-1) \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^M \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^{M-j} p_{i,0} \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^i c(M+1-i, j) v^{-j} &= \\ = \mu^2(v-1) \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^M \sum_{j=0}^M q_2(j) v^{-j}, & \end{aligned}$$

где

$$q_2(j) = \sum_{i=0}^{M-j} p_{i,0} \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^i c(M+1-i, j).$$

С учетом выполненных преобразований уравнение (14) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} (1-v)\lambda^2 p_{MN} v^{N+1} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^{M+1} + \lambda \mu \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^M \left(r_1(0)v + \sum_{j=0}^{M+1} q_1(j) v^{-j} \right) \sum_{j=0}^N p_{0,j} v^{j+1} - \\ - \mu^2 \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M-1} (v^2 - v) \sum_{j=0}^{M-1} r_2(j) v^{-j} + \mu^2(v-1) \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^M \sum_{j=0}^M q_2(j) v^{-j} = 0 \end{aligned}$$

или, после перемножения многочленов во втором слагаемом и сокращения на $(\sqrt{\mu/\lambda})^{M-1}$, в виде

$$\begin{aligned}
 & (1-v)\lambda^2 p_{MN} v^{N+1} \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M+3} + \\
 & + \mu \sqrt{\lambda \mu} \left[r_1(0) \sum_{j=0}^N p_{0,j} v^{j+2} + \sum_{j=0}^N v^{j+1} \sum_{k=j}^{\min(M+j+1, N)} p_{0,k} q_1(k-j) \right] + \\
 & + \mu \sqrt{\lambda \mu} \sum_{j=0}^M v^{-j} \sum_{k=0}^{M-j} p_{0,k} q_1(k+j+1) - \mu^2 \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \sum_{j=0}^M q_2(j) v^{-j} - \\
 & - \mu^2 \sum_{j=0}^{M-1} r_2(j) v^{-(j-2)} + \mu^2 \sum_{j=0}^{M-1} r_2(j) v^{-(j-1)} + \mu^2 \sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \sum_{j=0}^M q_2(j) v^{-(j-1)} = 0. \quad (22)
 \end{aligned}$$

Многочлен в (22) равен нулю при всех значениях v в интервале $([\mu(\lambda + 2\mu) - \sqrt{4\lambda\mu^3}] / [\lambda^2 + 4\mu^2], [\mu(\lambda + 2\mu) + \sqrt{4\lambda\mu^3}] / [\lambda^2 + 4\mu^2])$. Поэтому коэффициенты при каждой степени v в (22) должны быть равны нулю. Отсюда получаем еще одну систему уравнений в дополнение к системе (17)–(20):

$$\sqrt{\lambda \mu} r_1(0) p_{0,N} - \lambda \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M+1} p_{MN} = 0; \quad (23)$$

$$\lambda \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M+1} p_{MN} + \sqrt{\lambda \mu} [r_1(0) p_{0,N-1} + q_1(0) p_{0,N}] = 0; \quad (24)$$

$$r_1(0) p_{0,j} + \sum_{k=j+1}^N p_{0,k} q_1(k-j-1) = 0, \quad j = \overline{N-2, N-M-2}; \quad (25)$$

$$r_1(0) p_{0,j} + \sum_{k=j+1}^{M+j+2} p_{0,k} q_1(k-j-1) = 0, \quad j = \overline{N-M-3, 1}; \quad (26)$$

$$\sqrt{\lambda \mu} \left[r_1(0) p_{0,0} + \sum_{k=1}^{\min(M+2, N)} p_{0,k} q_1(k-1) \right] - \mu r_2(0) = 0. \quad (27)$$

Системы уравнений (17)–(20) и (23)–(27) вместе с уравнениями (1)–(9) и условием нормировки позволяют выписать рекуррентный алгоритм расчета распределения p_{ij} . Покажем это. Суммируя уравнения (19) и (20), приходим к равенству

$$\mu r_2(0) = \sqrt{\mu\lambda} \sum_{j=0}^N \sum_{k=j}^{\min(M+j, N)} p_{0,k} r_1(k-j) - \lambda \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M+1} \sum_{j=0}^N p_{M,j}. \quad (28)$$

Из принципа локального баланса следует, что

$$\sum_{j=0}^N p_{M,j} = \rho \sum_{j=0}^N p_{M-1,j} = \rho^2 \sum_{j=0}^N p_{M-2,j} = \dots = \rho^M \sum_{j=0}^N p_{0,j},$$

откуда, используя условие нормировки, получаем следующую формулу:

$$\sum_{j=0}^N p_{M,j} = \frac{\rho^M(1-\rho)}{\rho^{M+1}}.$$

Тогда равенство (28) можно переписать в виде:

$$r_2(0) = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu}} \left(p_{00} r_1(0) + \sum_{k=1}^M p_{0,k} r_1(k) + \sum_{j=0}^N \sum_{k=j}^{\min(M+j, N)} p_{0,k} r_1(k-j) \right) - \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^{M-1} \frac{\rho^M(1-\rho)}{1-\rho^{M+1}}.$$

Подставляя теперь данный вид в (27) и приводя подобные слагаемые, приходим к соотношению:

$$\left[\sum_{k=1}^M p_{0,k} (q_1(k-1) - r_1(k)) - \sum_{j=1}^N \sum_{k=j}^{\min(M+j, N)} p_{0,k} r_1(k-j) \right] + \left(\sqrt{\frac{\mu}{\lambda}} \right)^M \frac{\rho^M(1-\rho)}{1-\rho^{M+1}} = 0. \quad (29)$$

Теперь из уравнений (23)–(26) вероятности $p_{0,j}$, $j = \overline{N, 1}$, выражаются через p_{MN} и затем из (29) находится вероятность p_{MN} . Далее по формулам (20), (21) и (19) рассчитываются по очереди вероятности p_{Mj} , $j = \overline{1, N-1}$, p_{00} и $p_{M,0}$. Все остальные вероятности находятся из системы уравнений равновесия (1)–(9). Сначала из (1) находится p_{10} и из (2) находится $p_{M-1,0}$. Следующими по очереди находятся вероятность $p_{M-1,N}$ из (3) и вероятность $p_{1,N}$ из (4). Затем рассчитываются значения $p_{M-1,j}$, $j = \overline{1, N-1}$, из (5), $p_{1,j}$, $j = \overline{1, N-1}$, из (6) и $p_{i,N}$, $j = \overline{2, M-2}$, из (7). Наконец, для каждого $i = \overline{2, M-2}$ сначала из (8) находится вероятность $p_{i,0}$, а потом для $j = \overline{1, N-1}$ находятся $p_{i,j}$ из (9), на чем и заканчивается процедура нахождения совместного стационарного распределения.

4 Заключение

В заключение скажем несколько слов о достоинствах и недостатках предложенного метода.

Одним из основных недостатков является численная реализация алгоритма. Возникающие сложности связаны с необходимостью расчета значений многочленов Гегенбауэра и необходимостью работы с очень большими числами разных знаков. Кроме того, если имеется необходимость рассчитать все стационарные вероятности, то результаты, полученные по предложенному методу, могут уступать результатам, полученным с помощью других известных методов (например, с помощью метода исключения состояний) по точности, поскольку при вычислениях по рекуррентным формулам складываются числа с разными знаками.

К несомненным достоинствам метода стоит отнести то, что с его помощью удается находить в явном виде стационарное распределение многомерных цепей Маркова, определенных на конечном множестве состояний и получать явные расчетные формулы для важных вероятностно-временных характеристик (в данной работе — это вероятность потери заявки). Одним из интересных направлений исследования является разработка на основе полученных результатов приближенных методов расчета стационарного распределения.

Литература

1. *Disney R. L.* Some multichannel queueing problems and ordered entry // J. Ind. Eng., 1962. Vol. 13. P. 46–48.
2. *Disney R. L.* Some multichannel queueing problems and ordered entry. An application to conveyor theory // J. Ind. Eng., 1963. Vol. 14. P. 105–108.
3. *Gupta S. K.* Analysis of two-channel queueing system with ordered entry // J. Ind. Eng., 1966. Vol. 17. P. 54–55.
4. *Ginlar E., Disney R. L.* Streams of overflows from a finite queue // Oper. Res., 1967. Vol. 15. P. 131–134.
5. *Phillips D. T., Skeith R. W.* Ordered entry queueing networks with multiple servers and multiple queues // AIIE Trans., 1969. Vol. 1. Iss. 4. P. 333–342.
6. *Phillips D. T.* A markovian analysis of the conveyor-serviced ordered entry queuing system with multiple servers and multiple queues. — Fayetteville: University of Arkansas, 1969. 476 p.
7. *Matsui M., Fukuta J.* On a multichannel queueing system with ordered entry and heterogeneous servers // AIIE Trans., 1977. Vol. 9. Iss. 2. P. 209–214.
8. *Elsayed E. A., Proctor C. L.* Ordered entry and random choice conveyors with multiple Poisson input // Int. J. Prod. Res., 1977. Vol. 15. Iss. 5. P. 439–451.
9. *Lin B. W., Elsayed E. A.* A general solution for multichannel queueing systems with ordered entry // Int. J. Comp. Opns. Res., 1978. Vol. 5. P. 219–225.
10. *Rath J. H., Sheng D.* Approximations for overflows from queues with a finite waiting room // Oper. Res., 1979. Vol. 27. P. 1208–1216.

11. *Lin B. W., Elsayed E. A.* Transient behaviour of ordered-entry multichannel queueing systems // Int. J. Prod. Res., 1980. Vol. 18. Iss. 4. P. 491–501.
12. *Elsayed E. A.* Multichannel queueing systems with ordered entry and finite source // Comp. Opns. Res., 1983. Vol. 10. No. 3. P. 213–222.
13. *Nanwijn W. M.* A note on many-server queueing system with ordered entry, with an application to conveyor theory // J. Appl. Prob., 1983. Vol. 20. No. 1. P. 144–152.
14. *Nanwijn W. M.* On a two-server finite queueing system with ordered entry and deterministic arrivals // Euro. J. Opnl. Res., 1984. Vol. 18. P. 388–395.
15. *Yao D. D.* Convexity properties of the overflow in an ordered-entry system with heterogeneous servers // Opns. Res. Lett., 1986. Vol. 5. P. 145–147.
16. *Pourbabal B., Sonderman D.* Server utilization dactors in queueing loss sytems with ordered entry and heterogeneous servers // J. Appl. Prob., 1986. Vol. 23. P. 236–242.
17. *Yao D. D.* The arrangement of servers in an ordered-entry system // Oper. Res., 1987. Vol. 35. No. 5. P. 759–763.
18. *Shanthikumar J. G., Yao D. D.* Comparing ordered entry queues with heterogeneous servers // Queueing Syst., 1987. Vol. 2. Iss. 3. P. 235–244.
19. *Shirish S. J.* Regenerative simulation of an ordered-entry queueing system. — Richmond: Virginia Commonwealth University, 1989. 90 p.
20. *Okan Isguder H., Uzunoglu-Kocer U.* Analysis of GI/M/n/n queueing system with ordered entry and no waiting line // Appl. Math. Model., 2014. Vol. 38. Iss. 3. P. 1024–1032.
21. *Medhi J.* Stochastic models in queueing theory. — Amsterdam: Academic Press, 2003.
22. *Avrachenkov K. E., Vilchevsky N. O., Shevlyakov G. L.* Priority queueing with finite buffer size and randomized push-out mechanism // ACM Conference (International) on Measurement and Modeling of Computer Proceedings. — San Diego, 2003. P. 324–335. doi: 10.1145/781027.781079.
23. *Razumchik R. V.* Analysis of finite capacity queue with negative customers and bunker for ousted customers using Chebyshev and Gegenbauer polynomials // Asia Pacific J. Oper. Res., 2014. Vol. 31. No. 4. P. 1450029. 21 p. doi: 10.1142/S0217595914500298.
24. *Cége G.* Ортогональные многочлены / Пер. с англ. — М.: Физматлит, 1962. 500 c. (*Szegő G.* Orthogonal polynomials. — New York, NY, USA: American Mathematical Society, 1959. 511 p.)
25. *Erdelyi A., Bateman H.* Higher transcendental functions. — Malabar: Robert E. Krieger Publishing Co., 1985. Vol. II.

Поступила в редакцию 28.04.15

ON THE METHOD OF CALCULATING THE STATIONARY DISTRIBUTION IN THE FINITE TWO-CHANNEL SYSTEM WITH ORDERED INPUT

*I. S. Zaryadov¹, L. A. Meykhanadzhyan¹, T. A. Milovanova¹,
and R. V. Razumchik^{1,2}*

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

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

Abstract: This paper considers a queueing system with ordered input and two servers (labelled by numbers 1 and 2). Each server has a buffer of finite capacity in front of it. Queues capacities are different. Customers arrive according to a Poisson process with constant rate. Upon arrival, a new customer goes to the server with label 1 or, if it is busy, occupies a place in the queue in front of it. If upon arrival a customer sees the queue in front of the server 1 full, it goes to the server with label 2 or, if it is busy, enters the queue in front of it. If upon arrival of a new customer the system is full, the new customer is lost. Customers from both queues are served according to the FIFO (first in, first out) discipline and each server serves customers exponentially distributed times with the same parameter. A new method for recursive computation of the joint stationary distribution of queues is proposed.

Keywords: queueing system; special functions; two-dimensional Markov chain; joint distribution

DOI: 10.14357/08696527150303

Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 15-07-03007 and 15-07-03406).

References

1. Disney, R. L. 1962. Some multichannel queueing problems and ordered entry. *J. Ind. Eng.* 13:46–48.
2. Disney, R. L. 1963. Some multichannel queueing problems and ordered entry. An application to conveyor theory. *J. Ind. Eng.* 14:105–108.
3. Gupta, S. K. 1966. Analysis of two-channel queueing system with ordered entry. *J. Ind. Eng.* 17:54–55.

4. Ginlar, E., and R. L. Disney. 1967. Streams of overflows from a finite queue. *Oper. Res.* 15:131–134.
5. Phillips, D. T., and R. W. Skeith. 1969. Ordered entry queueing networks with multiple servers and multiple queues. *AIEE Trans.* 1(4):333–342.
6. Phillips, D. T. 1969. *A markovian analysis of the conveyor-serviced ordered entry queueing system with multiple servers and multiple queues*. Fayetteville: University of Arkansas. 476 p.
7. Matsui, M., and J. Fukuta. 1977. On a multichannel queueing system with ordered entry and heterogeneous servers. *AIEE Trans.* 9(2):209–214.
8. Elsayed, E. A., and C. L. Proctor. 1977. Ordered entry and random choice conveyors with multiple Poisson input. *Int. J. Prod. Res.* 15(5):439–451.
9. Lin, B. W., and E. A. Elsayed. 1978. A general solution for multichannel queueing systems with ordered entry. *Int. J. Comp. Opns. Res.* 5:219–225.
10. Rath, J. H., and D. Sheng. 1979. Approximations for overflows from queues with a finite waiting room. *Oper. Res.* 27:1208–1216.
11. Lin, B. W., and E. A. Elsayed. 1980. Transient behaviour of ordered-entry multichannel queueing systems. *Int. J. Prod. Res.* 18(4):491–501.
12. Elsayed, E. A. 1983. Multichannel queueing systems with ordered entry and finite source. *Comp. Opns. Res.* 10(3):213–222.
13. Nanwijn, W. M. 1983. A note on many-server queueing system with ordered entry, with an application to conveyor theory. *J. Appl. Prob.* 20(1):144–152.
14. Nanwijn, W. M. 1984. On a two-server finite queueing system with ordered entry and deterministic arrivals. *Euro. J. Opnl. Res.* 18:388–395.
15. Yao, D. D. 1986. Convexity properties of the overflow in an ordered-entry system with heterogeneous servers. *Opns. Res. Lett.* 5:145–147.
16. Pourbabal, B., and D. Sonderman. 1986. Server utilization dactors in queueing loss sytems with ordered entry and heterogeneous servers. *J. Appl. Prob.* 23:236–242.
17. Yao, D. D. 1987. The arrangement of servers in an ordered-entry system. *Oper. Res.* 35(5):759–763.
18. Shanthikumar, J. G., and D. D. Yao. 1987. Comparing ordered entry queues with heterogeneous servers. *Queueing Syst.* 2(3):235–244.
19. Shirish, S. J. 1989. *Regenerative simulation of an ordered-entry queueing system*. Virginia Commonwealth University. 90 p.
20. H. Okan Isguder, and Umay Uzunoglu-Kocer. 2014. Analysis of $GI/M/n/n$ queueing system with ordered entry and no waiting line *Appl. Math. Modelling* 38(3):1024–1032.
21. Medhi, J. 2002. *Stochastic models in queueing theory*. Elsevier Science Publishing.
22. Avrachenkov, K. E., N. O. Vilchevsky, and G. L. Shevljakov. 2003. Priority queueing with finite buffer size and randomized push-out mechanism. *ACM Conference (International) on Measurement and Modeling of Computer Proceedings*. San Diego. 324–335. doi: 10.1145/781027.781079.
23. Razumchik, R. V. 2014. Analysis of finite capacity queue with negative customers and bunker for ousted customers using chebyshev and gegenbauer polynomials. *Asia Pacific J. Oper. Res.* 31(4):1450029. 21 p. doi: 10.1142/S0217595914500298.

24. Szegő, G. 1959. *Orthogonal polynomials*. New York, NY: American Mathematical Society. 511 p.
25. Erdelyi, A., and H. Bateman. 1985. *Higher transcendental functions*. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Co. Vol. II.

Received April 28, 2015

Contributors

Zaryadov Ivan. S. (b. 1981) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; izaryadov@sci.pfu.edu.ru

Meykhanadzhyan Lusine A. (b. 1990) — PhD student, Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; lameykhnadzhyan@gmail.com

Milovanova Tatiana A. (b. 1977) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior lecturer, Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; tmilovanova77@mail.ru

Razumchik Rostislav V. (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; rrazumchik@ieee.org

ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ*

М. С. Попова¹, В. В. Стрижов²

Аннотация: Статья посвящена решению задачи классификации временных рядов с использованием нейронных сетей глубокого обучения. Предлагается использовать многоуровневую суперпозицию моделей, относящихся к следующим классам нейронных сетей: двухслойные нейронные сети, машины Больцмана и автокодировщики. Нижние уровни суперпозиции выделяют из зашумленных данных высокой размерности информативные признаки, а верхний уровень по этим признакам решает задачу классификации. Предложенная модель была протестирована на двух выборках временных рядов физической активности человека. Результаты классификации, полученные предлагаемой моделью в ходе вычислительного эксперимента, сравнивались с результатами, которые были получены на этих же данных в работах зарубежных авторов. Исследование показало возможность применения нейронных сетей глубокого обучения к решению прикладных задач классификации физической активности человека.

Ключевые слова: классификация; временные ряды; нейронные сети глубокого обучения; суперпозиция моделей; выделение признаков

DOI: 10.14357/08696527150304

1 Введение

В данной работе рассматривается задача классификации временных рядов. Под временным рядом понимается упорядоченный набор измерений некоторой величины, в котором каждое измерение соответствует определенному моменту времени. Временные ряды обладают уникальными свойствами [1], которые усложняют работу с ними. Примерами таких свойств служат высокая размерность и зашумленность данных. Существуют методы снижения размерности и фильтрации шумов [2–4]. Однако при снижении размерности пространства данных и выделении новых признаков снижается точность описания объектов. Ввиду этого возникает задача построения нового признакового пространства меньшей размерности, в котором признаки наиболее полно описывали бы исходные временные ряды.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-07-00709).

¹Московский физико-технический институт, maria.popova@phystech.edu

²Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, strijov@ccas.com

Существует два основных способа построения признакового пространства — это экспертное и автоматическое выделение признаков. Первый способ заключается в экспертном назначении базовых функций и требует индивидуального подхода к каждой отдельной задаче, так как одни и те же базовые функции не могут достаточно точно описывать данные разной природы. Второй способ является более универсальным, и некоторые методы, успешно применяемые для предобработки временных рядов, описаны в [5–7]. В данной работе предлагается использовать нейронные сети глубокого обучения для выделения информативных признаков [6, 8, 9] и классификации временных рядов.

Нейронные сети глубокого обучения применяются для решения задач распознавания изображений [10] и речи [11], однако есть работы, показывающие возможность их применения к предобработке и классификации временных рядов [12, 13]. Предлагается использовать многоуровневую суперпозицию [6] ограниченных машин Больцмана [14, 15], автокодировщиков [14] и двухслойных нейронных сетей для машинного извлечения признаков и классификации временных рядов. Все уровни суперпозиции, кроме последнего, обучаются по принципу «обучение без учителя» и участвуют в построении признакового пространства. Последний уровень суперпозиции обучается «с учителем» и решает задачу классификации по признакам, выделенным на нижних уровнях суперпозиции. Такая конструкция позволяет снизить размерность пространства признаков, информативно описывающих исследуемое явление, а затем решить задачу классификации, основываясь на небольшом числе выделенных признаков. В данной работе поставлен вычислительный эксперимент на двух выборках — временных рядах акселерометра и временных рядах акселерометра и гироскопа мобильного телефона. Результаты классификации, полученные с помощью предложенной модели, сравнивались с результатами, полученными на тех же данных в других работах [16, 17]. Исследование показало возможность применения нейронных сетей глубокого обучения к решению прикладной задачи классификации физической активности человека.

2 Постановка задачи

Дана выборка $\mathfrak{D} = \{(\mathbf{x}_i, t_i), i = 1, \dots, N\}$, состоящая из N пар объект–ответ. Объектами \mathbf{x}_i являются сегменты временного ряда — $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$. Каждый объект принадлежит одному из M классов, метки классов $t_i \in \{1, \dots, M\}$. Выборка \mathfrak{D} разделена на две подвыборки — обучающую \mathfrak{L} и контрольную \mathfrak{T} .

Моделью классификации назовем суперпозицию функций

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \boldsymbol{\mu}_1 (\boldsymbol{\mu}_2 (\cdots \boldsymbol{\mu}_K (\mathbf{x}))) : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]^M, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\mu}_k$, $k \in \{1, \dots, K\}$, — модели из класса нейронных сетей с соответствующими векторами параметров \mathbf{w}_k , $k \in \{1, \dots, K\}$. Под вектором параметров модели \mathbf{f} будем понимать вектор $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K]^T$.

Компоненты вектора $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ – это вероятности отнести объект \mathbf{x}_i к соответствующему классу:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \begin{bmatrix} p(y_1 = 1|\mathbf{x}; \mathbf{w}) \\ p(y_2 = 2|\mathbf{x}; \mathbf{w}) \\ \vdots \\ p(y_M = M|\mathbf{x}; \mathbf{w}) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Функцию ошибки S на некоторой подвыборке \mathfrak{K} исходной выборки \mathfrak{D} определим следующим образом:

$$S(\mathbf{w}|\mathfrak{K}) = -\frac{1}{|\mathfrak{K}|} \sum_{i=1}^{|\mathfrak{K}|} \sum_{\xi=1}^M [y_\xi = \xi] \log p(y_\xi = \xi | \mathbf{x}_i, \mathbf{w}). \quad (3)$$

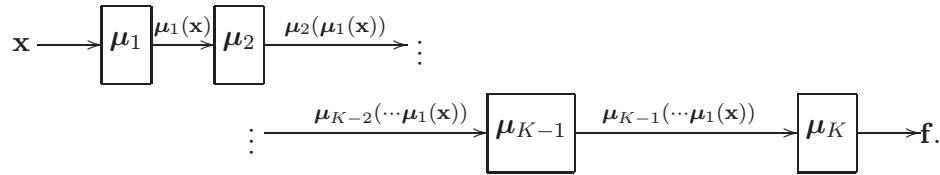
Для решения задачи классификации выборки \mathfrak{D} с помощью модели нужно оптимизировать ее параметры \mathbf{w} . Для этого требуется решить задачу минимизации функции ошибки на обучающей выборке:

$$\hat{\mathbf{w}} = \underset{\mathbf{w}}{\operatorname{argmin}} S(\mathbf{w}|\mathfrak{L}). \quad (4)$$

Для дополнительной оценки качества классификации будем вычислять значения функционала AUC (area under curve) на контрольной выборке для каждого класса по принципу один против всех и визуализировать полученные результаты с помощью ROC (receiver operating characteristics) кривых.

3 Описание алгоритма

Согласно (1) предлагаемая модель представляет из себя K -уровневую суперпозицию нейронных сетей:



В данной работе будем рассматривать нейронные сети следующих типов: ограниченная машина Больцмана, автокодировщик и двухслойная нейронная сеть. Далее будет описан каждый из вышеперечисленных типов нейронных сетей.

3.1 Ограниченнная машина Больцмана

Ограниченнная машина Больцмана — это двухслойная нейронная сеть. Структура ограниченной машины Больцмана представляет из себя двудольный граф. Нейроны первого слоя называются видимыми и соответствуют значениям признаков объекта. Вектор состояний нейронов первого слоя — это вектор $\mathbf{v} = \{v_l \in \mathbb{R}, l \in \text{vis}\}$, а $\text{vis} = \{1, \dots, L\}$ — множество индексов видимых нейронов. Нейроны второго слоя называются скрытыми и участвуют в выделении признаков. В данной работе нейроны скрытого слоя могут находиться в одном из двух состояний — 0 или 1. Вектор состояний — это вектор $\mathbf{h} = \{h_j \in [0, 1], j \in \text{hid}\}$, $\text{hid} = \{1, \dots, J\}$ — множество индексов скрытых нейронов. Каждая компонента h_j вектора состояний — это вероятность того, что j -й нейрон скрытого слоя находится в состоянии 1:

$$h_j = p(j\text{-й нейрон в состоянии 1}). \quad (5)$$

Таким образом, ограниченнная машина Больцмана — это вероятностная модель. Вероятность пары векторов состояний нейронов (\mathbf{v}, \mathbf{h}) определяется следующим образом:

$$p(\mathbf{v}, \mathbf{h}) = \frac{1}{Z} \exp(-E(\mathbf{v}, \mathbf{h})), \quad (6)$$

где $E(\mathbf{v}, \mathbf{h})$ — это значение энергии пары (\mathbf{v}, \mathbf{h}) , а Z — нормировочная величина, которая определяется следующим образом:

$$Z = \sum_{\mathbf{v}, \mathbf{h}} \exp(-E(\mathbf{v}, \mathbf{h})).$$

Выражение для энергии пары $E(\mathbf{v}, \mathbf{h})$ зависит от типа объектов, которые требуется моделировать ограниченной машиной Больцмана. В данной работе используется энергия для моделирования бинарных данных

$$E(\mathbf{v}, \mathbf{h}) = - \sum_{l \in \text{vis}} b_l^v v_l - \sum_{j \in \text{hid}} b_j^h h_j - \sum_{l, j} v_l h_j w_{lj} \quad (7)$$

или, как вариант, энергия для моделирования вещественных данных

$$E(\mathbf{v}, \mathbf{h}) = \sum_{l \in \text{vis}} \frac{(v_l - b_l^v)^2}{2\sigma_l^2} - \sum_{j \in \text{hid}} b_j^h h_j - \sum_{l, j} \frac{v_l}{\sigma_l} h_j w_{lj}, \quad (8)$$

где σ_l — стандартное нормальное отклонение шума l -го признака, параметры b_l^v , b_j^h , $l \in \text{vis}$, $j \in \text{hid}$, — смещения нейронов видимого и скрытого слоев и $\mathbf{W} = [w_{lj}]$, $l \in \text{vis}$, $j \in \text{hid}$ — матрица весовых коэффициентов между нейронами видимого и скрытого слоев.

Вероятность входного вектора состояний \mathbf{v} , или вероятность того, что входной вектор \mathbf{v} описывается моделью (6), выражается как сумма по всем скрытым состояниям:

$$p(\mathbf{v}) = \sum_{\mathbf{h}} p(\mathbf{v}, \mathbf{h}) = \frac{1}{Z} \sum_{\mathbf{h}} \exp(-E(\mathbf{v}, \mathbf{h})).$$

Приведем выражения для условных вероятностей [14], которые понадобятся далее для оптимизации параметров:

$$\begin{aligned} p(\mathbf{h}|\mathbf{v}) &= \frac{p(\mathbf{v}, \mathbf{h})}{p(\mathbf{v})} = \frac{\exp(-E(\mathbf{v}, \mathbf{h}))}{\sum_{\mathbf{h}} \exp(-E(\mathbf{v}, \mathbf{h}))} = \prod_{j \in \text{hid}} p(h_j|\mathbf{v}); \\ p(\mathbf{v}|\mathbf{h}) &= \frac{p(\mathbf{v}, \mathbf{h})}{p(\mathbf{h})} = \frac{\exp(-E(\mathbf{v}, \mathbf{h}))}{\sum_{\mathbf{v}} \exp(-E(\mathbf{v}, \mathbf{h}))} = \prod_{l \in \text{vis}} p(v_l|\mathbf{h}). \end{aligned}$$

Оптимизация параметров ограниченной машины Больцмана заключается в нахождении таких значений параметров $\Theta = \{w_{lj}, b_l^v, b_l^h, l \in \text{vis}, j \in \text{hid}\}$, при которых величина вероятности элементов обучающей выборки имеет наибольшее значение:

$$\hat{\Theta} = \underset{\Theta}{\operatorname{argmax}} p(\mathcal{L}; \Theta) = \prod_{\mathbf{x} \in \mathcal{L}} \frac{1}{Z} \sum_{\mathbf{h}} e^{-E(\mathbf{x}, \mathbf{h})}.$$

Выражение для энергии (8) используется, если соответствующая машина Больцмана является первым уровнем суперпозиции (1). В остальных случаях используется выражение (7).

3.2 Алгоритм оптимизации параметров ограниченной машины Больцмана

Приведем краткое описание алгоритма оптимизации параметров ограниченной машины Больцмана с одношаговым сэмплированием Гиббса. С подробным описанием и обоснованием можно ознакомиться в [14].

Ниже приведен псевдокод одного шага алгоритма. Один цикл оптимизации ограниченной машины Больцмана состоит в повторении этого шага для всех объектов обучающей выборки. Предлагается выполнять некоторое заданное количество циклов.

Исходные параметры: \mathbf{x} — входной вектор признаков; $\mathbf{W}, \mathbf{b}^v, \mathbf{b}^h$ — начальные значения параметров.

Результат: $\mathbf{W}, \mathbf{b}^v, \mathbf{b}^h$ — значения параметров после одного шага оптимизации.

Инициализация

$\mathbf{v}_1 = \mathbf{x}$;

для каждого $j \in \text{hid}$ **выполнять**

| вычислить вероятность $p(h_{1j} = 1 | \mathbf{v}_1)$;
| выбрать значение h_{1j} из множества $\{0, 1\}$ в зависимости от величины
 $p(h_{1j} | \mathbf{v}_1)$;

конец цикла

для каждого $k \in \text{vis}$ **выполнять**

| вычислить вероятность $p(v_{2k} = 1 | \mathbf{h}_1)$;
| выбрать значение v_{2k} из множества $\{0, 1\}$ в зависимости от величины
вероятности $p(v_{2k} | \mathbf{h}_1)$;

конец цикла

для каждого $j \in \text{hid}$ **выполнять**

| вычислить $P(h_{2j} = 1 | \mathbf{v}_2)$;

конец цикла

$\mathbf{W} \leftarrow \mathbf{W} + \eta(\mathbf{h}_1 \mathbf{v}_1^T - p(\mathbf{h}_{2*} = 1 | \mathbf{v}_1) \mathbf{v}_2^T)$;

$\mathbf{b}^v \leftarrow \mathbf{a} + \eta(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)$;

$\mathbf{b}^h \leftarrow \mathbf{b} + \eta(\mathbf{h}_1 - p(\mathbf{h}_{2*} = 1 | \mathbf{v}_2))$.

3.3 Автокодировщик

Автокодировщик представляет собой следующую суперпозицию блоков:

$$\boldsymbol{\mu} = \varphi(\mathbf{g}(\mathbf{x})).$$

Здесь \mathbf{g} — кодирующий блок, или encoder:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{W}_g \mathbf{x} + \mathbf{b}_g); \quad (9)$$

$\varphi(\mathbf{g}(\mathbf{x}))$ — декодирующий блок, или decoder:

$$\varphi(\mathbf{g}(\mathbf{x})) = \sigma(\mathbf{W}_h \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}_h), \quad (10)$$

где \mathbf{W}_g , \mathbf{W}_φ , \mathbf{b}_g , \mathbf{b}_φ — параметры автокодировщика; $\sigma(\mathbf{t}) = 1/(1 + \exp(-\mathbf{t}))$ — сигмоидная функция.

Под образом вектора \mathbf{x} будем понимать вектор $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{W}_g \mathbf{x} + \mathbf{b}_g)$.

Будем предполагать, что в данной модели матрицы \mathbf{W}_g и \mathbf{W}_φ ортогональны:

$$\mathbf{W}_\varphi = \mathbf{W}_g^T.$$

Оптимизация параметров автокодировщика $\boldsymbol{\Theta} = (\mathbf{W}_g, \mathbf{W}_h, \mathbf{b}_g, \mathbf{b}_h)$ проводится так, чтобы по прообразу $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ можно было восстановить образ \mathbf{x} с помощью

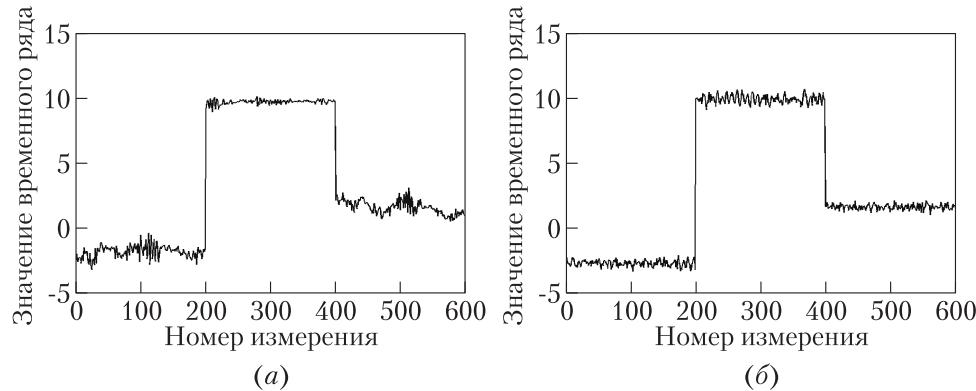


Рис. 1 Прообраз (а) и восстановленный прообраз (б) сегмента временного ряда

преобразования (10) или, другими словами, чтобы выходной вектор \mathbf{f} был как можно больше похож на входной вектор \mathbf{x} для всех элементов обучающей выборки. Мерой сходства в данной работе выступает следующая функция:

$$S(\Theta, \mathbf{x}) = \|\mathbf{f}(\mathbf{x}|\Theta) - \mathbf{x}\|_2^2.$$

Таким образом,

$$\hat{\Theta} = \underset{\Theta}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2|\mathcal{L}|} \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{L}} S(\Theta, \mathbf{x}). \quad (11)$$

Для оптимизации параметров автокодировщика нужно выбрать начальное приближение для параметров каждого блока в отдельности [15], а затем настроить параметры всей модели как целого методом обратного распространения ошибки [6].

На рис. 1 изображены прообраз и восстановленный прообраз сегмента временного ряда с помощью автокодировщика.

3.4 Двухслойная нейронная сеть

Двухслойная нейронная сеть — это отображение вида

$$\mathbf{a}(\mathbf{x}) = \mathbf{W}_2^T \tanh(\mathbf{W}_1^T \mathbf{x}); \quad (12)$$

$$\mu(\mathbf{x}) = \frac{\exp(\mathbf{a}(\mathbf{x}))}{\sum_{j=1}^n \exp(a_j(\mathbf{x}))}. \quad (13)$$

Вектор μ интерпретируется как вектор вероятностей: μ_ξ есть вероятность того, что вектор \mathbf{x} принадлежит классу с номером ξ :

$$\mu(\mathbf{x}) = \{\mu_\xi\}, \quad 0 \leq \mu_\xi \leq 1, \quad \sum \mu_\xi = 1, \quad \xi = 1, \dots, M.$$

Под вектором параметров двухслойной нейронной сети будем понимать $\mathbf{w} = \text{vec}(\mathbf{W}_1^T | \mathbf{W}_2^T)$, где \mathbf{W}_1 и \mathbf{W}_2 — матрицы весов первого и второго слоя нейронной сети (12). Вектор меток классов $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_\xi, \dots, y_M]^T$ определим следующим образом:

$$y_\xi = \begin{cases} 1, & \text{если } \xi = \underset{\xi \in \{1, \dots, M\}}{\operatorname{argmax}} (f_\xi) ; \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

В качестве функции ошибки выберем функцию

$$S(\mathbf{w} | \mathfrak{K}) = - \sum_{\mathbf{x} \in \mathfrak{K}} \sum_{\xi=1}^M [y_t = 1] \ln (f_\xi(\mathbf{x}, \mathbf{w})), \quad (14)$$

максимизирующую логарифм правдоподобия мультиномиально распределенной случайной величины \mathbf{y} и заданную на подвыборке \mathfrak{K} исходной выборки \mathfrak{D} , t — истинная метка класса.

Оптимизация параметров двухслойной нейронной сети заключается в том, чтобы найти вектор параметров \mathbf{w} , минимизирующий функцию ошибки S по обучающей выборке. В данной работе оптимизация параметров проводится методом обратного распространения ошибки.

4 Вычислительный эксперимент

В вычислительном эксперименте использовалось два набора временных рядов с датчиков мобильного устройства — WISDM [16] и HAR [17]. Цель вычислительного эксперимента заключалась в повышении точности классификации для различных типов суперпозиции моделей и сравнении их со значениями точности из работ [16, 17]. В вычислительном эксперименте также получены значения AUC для каждого из классов и построены соответствующие ROC-кривые.

4.1 Программное обеспечение

Для построения модели как суперпозиции блоков, описанных в предыдущем разделе, было реализовано программное обеспечение на языке MatLab. Для этого были использованы инструментарии [18–21]. На рис. 2 и 3 изображены схемы в стандарте IDEF0, описывающие структуру проекта.

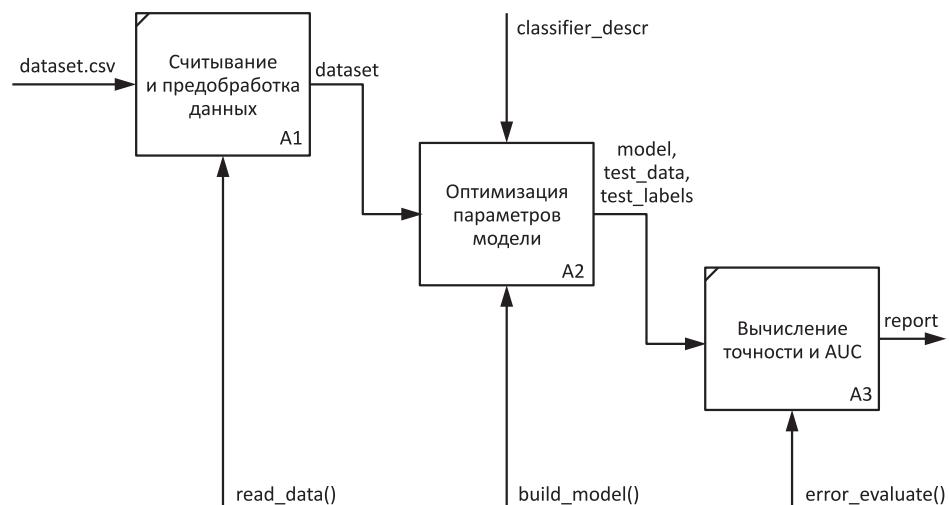


Рис. 2 Общая структура проекта

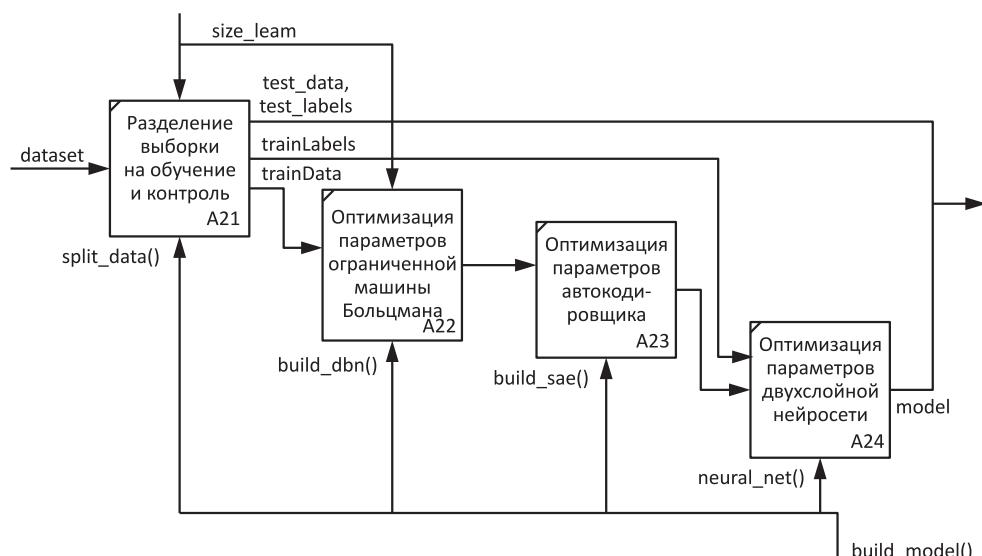


Рис. 3 Структура блока А2 «Оптимизация параметров модели»

4.2 Эксперимент на наборе данных WISDM

Первый набор состоял из сегментов временных рядов акселерометра мобильного телефона, каждый из которых описывал один из четырех типов физической активности человека — ходьбу, бег, стояние и сидение. Сегмент представлял собой 10-секундный отрезок исходного временного ряда и состоял из 600 измерений — по 200 измерений проекции ускорения на каждую из координатных осей. С более подробным описанием данных можно ознакомиться в работе [16].

Выборка состояла из 4219 объектов и была неоднородной по числу элементов в разных классах. Для того чтобы избежать такого эффекта, как игнорирование моделью малочисленных классов, в обучающую выборку добавлялись повторяющиеся объекты таким образом, чтобы сбалансировать число представителей каждого класса. Разделение на обучающую и контрольную выборку проводилось случайным образом в соотношении 3 : 1. В эксперименте использовались следующие суперпозиции: трехслойная суперпозиция, состоящая из машины Больцмана, автокодировщика и двухслойной нейросети с 300, 200 и 100 нейронами в каждом слое соответственно; четырехслойная суперпозиция, состоящая из машины Больцмана, еще одной машины Больцмана, автокодировщика и двухслойной нейросети с 400, 300, 200 и 100 нейронами в каждом слое соответственно; а также пятислойная суперпозиция, состоящая из двух машин Больцмана, двух автокодировщиков и двухслойной нейросети с 500, 400, 300, 200 и 100 нейронами в каждом слое соответственно.

В табл. 1 приведены результаты точности классификации для описанных выше моделей, а также результаты из работы [16].

В табл. 2 приведены значения функционала AUC, а на рис. 4 — соответствующие ROC-кривые.

Таблица 1 Сравнительные результаты

Модель	Бег	Ходьба	Сидение	Стояние
3 слоя	98%	95%	100%	89%
4 слоя	95%	94%	100%	82%
5 слоев	97%	96%	100%	84%
[16]	98%	92%	95%	92%

Таблица 2 Значения функционала AUC

Модель	Бег	Ходьба	Сидение	Стояние
3 слоя	0,985	0,964	0,999	0,902
4 слоя	0,983	0,964	0,990	0,960
5 слоев	0,981	0,939	1,000	0,822

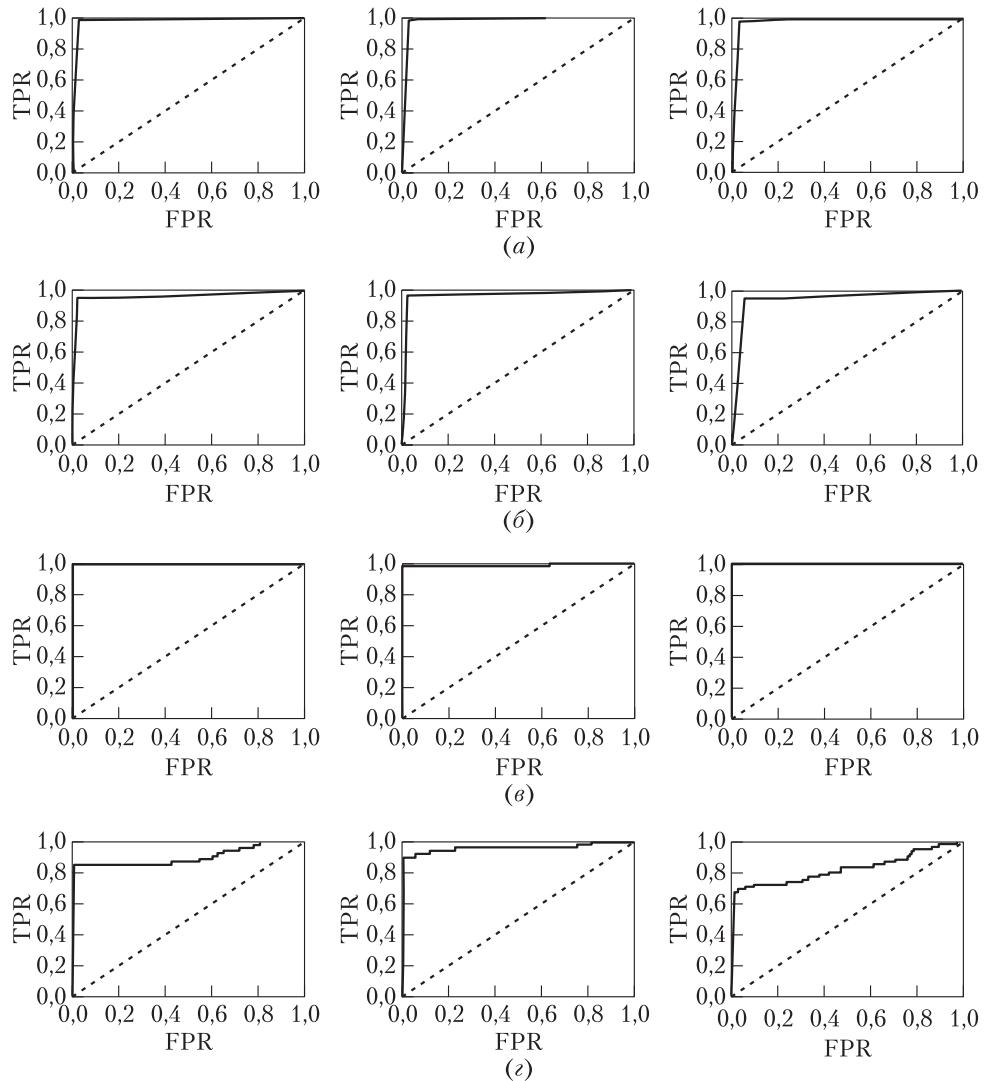


Рис. 4 ROC-кривые (TPR — true positive rate; FPR — false positive rate) для суперпозиций из трех слоев (слева), из четырех слоев (в центре) и из пяти слоев (справа) для каждого класса: (а) бег; (б) ходьба; (в) сидение; (г) стояние

4.3 Эксперимент на наборе данных HAR

Второй набор состоял из векторов признаков, полученных предварительной обработкой сегментов временных рядов с акселерометра и гироскопа мобильного телефона Samsung Galaxy S II. Временные ряды сегментировались на 2,56-секундные отрезки, из которых затем получали вектор из 561 признака. Более подробное описание данных приведено в [17]. В этой части вычислительного эксперимента, как и в предыдущей, использовались следующие суперпозиции: трехслойная суперпозиция, состоящая из машины Больцмана, автокодировщика и двухслойной нейросети с 300, 200 и 100 нейронами в каждом слое соответственно, четырехслойная суперпозиция, состоящая из машины Больцмана, машины Больцмана, автокодировщика и двухслойной нейросети с 400, 300, 200 и 100 нейронами в каждом слое соответственно, а также пятислойная суперпозиция, состоящая из двух машин Больцмана, двух автокодировщиков и двухслойной нейросети с 500, 400, 300, 200 и 100 нейронами в каждом слое соответственно. В табл. 3 приведены результаты точности классификации для описанных выше моделей, а также результаты из работы [17]. В табл. 4 приведены значения функционала AUC, а на рис. 5 и 6 – соответствующие ROC-кривые.

Таблица 3 Сравнительные результаты

Модель	Ходьба	Подъем	Спуск	Сидение	Стояние	Лежание
3 слоя	96%	94%	98%	91%	75%	99,7%
4 слоя	98%	93%	92%	65%	80%	98%
5 слоев	96%	80%	96%	84%	71%	92%
[17]	97%	87%	72%	95%	97%	100%

Таблица 4 Значения функционала AUC

Модель	Ходьба	Подъем	Спуск	Сидение	Стояние	Лежание
3 слоя	0,986	0,969	0,974	0,934	0,866	0,995
4 слоя	0,982	0,989	0,984	0,767	0,903	0,987
5 слоев	0,9672	0,958	0,969	0,828	0,858	0,981

5 Заключение

В данной работе решалась задача классификации временных рядов. В качестве модели классификации была предложена суперпозиция нейронных сетей глубокого обучения. В вычислительном эксперименте рассматривалась задача многоклассовой классификации физической активности по измерениям с датчиков мобильного телефона. Для выполнения вычислительного эксперимента было реализовано программное обеспечение на языке MatLab, агрегирующее в себе несколько инструментариев. Точность классификации предложенной моделью вычислялась на наборах данных из [16, 17] и сравнивалась с точностью, получен-

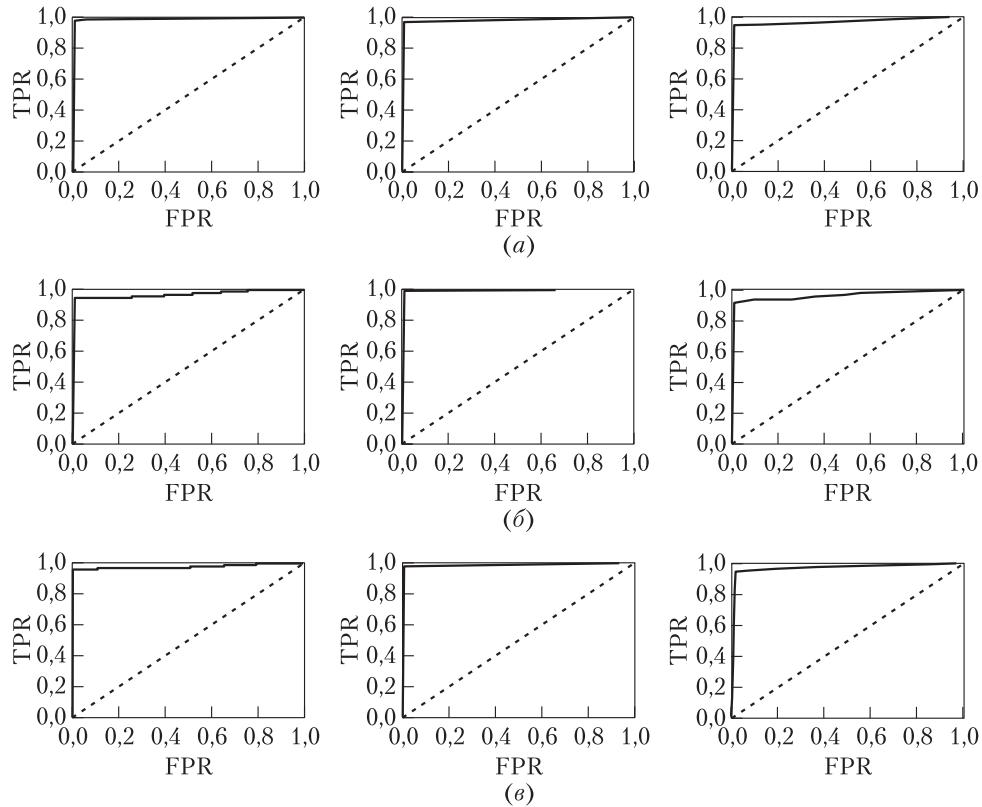


Рис. 5 ROC-кривые для суперпозиций из трех слоев (слева), из четырех слоев (в центре), из пяти слоев (справа) для каждого класса: (a) ходьба; (б) подъем; (в) спуск

ной в этих работах. Полученные результаты оказались сравнимы с результатами из соответствующих работ, что говорит о возможности применения суперпозиции нейронных сетей глубокого обучения к решению задачи классификации временных рядов.

Литература

1. Längkvist M., Karlsson L., Loutfi A. A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling // Pattern Recognition Lett., 2014. Vol. 42. No. 6. P. 11–24. doi: 10.1016/j.patrec.2014.01.008.
2. Keogh E., Pazzani M. A simple dimensionality reduction technique for fast similarity search in large time series databases // Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining Proceedings. — Kyoto, Japan: Springer, 2000. P. 122–133.

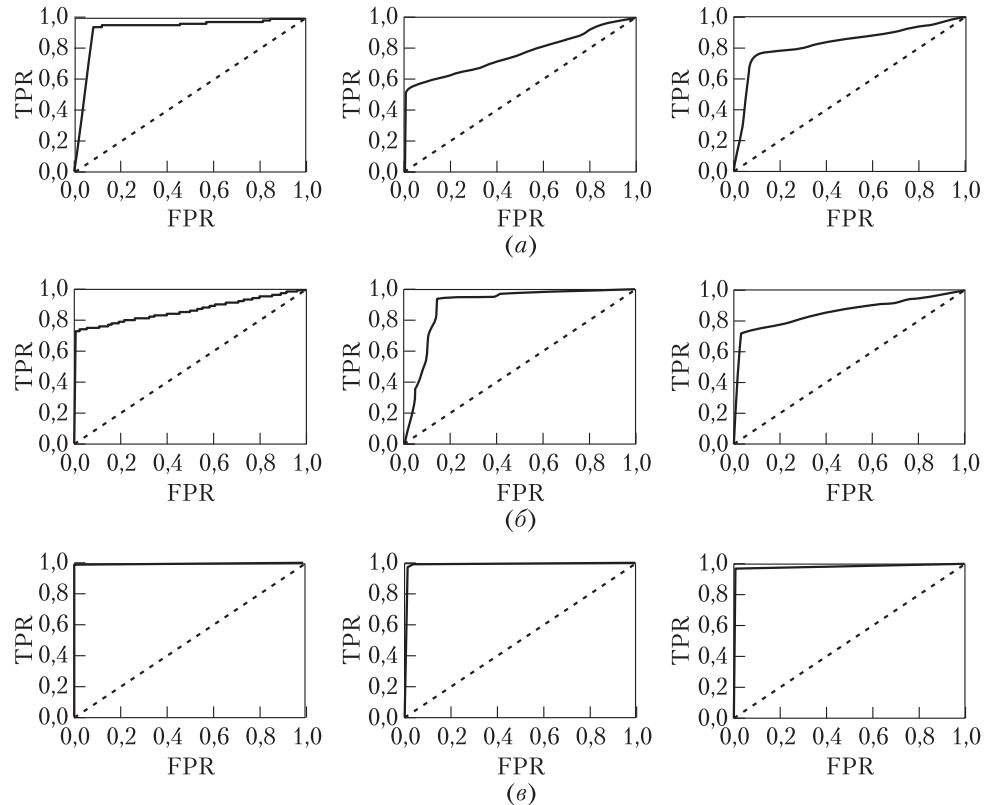


Рис. 6 ROC-кривые для суперпозиций из трех слоев (слева), из четырех слоев (в центре), из пяти слоев (справа) для каждого класса: (a) сидение; (б) стояние; (в) лежание

3. Weston J., Mukherjee S., Chapelle O., Pontil M., Poggio T., Vapnik V. Feature selection for SVMs // Advances in neural information processing systems / Eds. T. K. Leen, T. G. Dietterich, V. Tresp. — Denver, CO, USA: MIT Press, 2000. Vol. 13. P. 668–674.
4. Nanopoulos A., Alcock R., Manolopoulos Y. Feature-based classification of time-series data // Int. J. Comput. Res., 2001. Vol. 10. P. 49–61.
5. Mörchen F. Time series feature extraction for data mining using DWT and DFT // OAI-PMH server at citeseerx.ist.psu.edu, 2003. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.87.2037>.
6. Hinton G. E., Salakhutdinov R. R. Reducing the dimensionality of data with neural networks // Science, 2006. Vol. 313. No. 5786. P. 504–507.
7. Estévez P. A., Tesmer M., Perez C. A., Zurada J. M. Normalized mutual information feature selection // IEEE Trans. Neural Networks, 2009. Vol. 20. No. 2. P. 189–201.

8. Stuhlsatz A., Lippel J., Zielke T. Feature extraction with deep neural networks by a generalized discriminant analysis // IEEE Trans. Neural Networks Learning Syst., 2012. Vol. 23. No. 4. P. 596–608.
9. Ren Y., Wu Y. Convolutional deep belief networks for feature extraction of EEG signal // Joint Conference (International) on Neural Networks (IJCNN 2014) Proceedings. — Beijing, China: IEEE, 2014. P. 2850–2853.
10. Xu Y., Mo T., Feng Q., Zhong P., Lai M., Chang C. Deep learning of feature representation with multiple instance learning for medical image analysis // IEEE Conference (International) on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2014) Proceedings. — Florence, Italy: IEEE, 2014. P. 1626–1630.
11. Hinton G. E., Li Deng, Dong Yu, Dahl G. E., Mohamed A., Jaitly N., Senior A., Vanhoucke V., Nguyen P., Sainath T. N., Kingsbury B. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups // IEEE Signal Process. Mag., 2012. Vol. 29. No. 6. P. 82–97.
12. Hüskens M., Stagge P. Recurrent neural networks for time series classification // Neurocomputing, 2003. Vol. 50. P. 223–235.
13. Wulsin D., Gupta J., Mani R., Blanco J., Litt B. Modeling electroencephalography waveforms with semi-supervised deep belief nets: Faster classification and anomaly measurement // J. Neural Eng., 2011. Vol. 8. P. 1741–2552.
14. Bengio Y. Learning deep architectures for AI // Foundations Trends Machine Learning, 2009. Vol. 2. No. 1. P. 1–127.
15. Hinton G. E. A practical guide to training restricted Boltzmann machines // Neural networks: Tricks of the trade. — 2nd ed. — Springer, 2012. P. 599–619.
16. Kwapisz J. R., Weiss G. M., Moore S. Activity recognition using cell phone accelerometers // SIGKDD Explorations, 2010. Vol. 12. No 2. P. 74–82.
17. Anguita D., Ghio A., Oneto L., Parra X., Reyes-Ortiz J. L. Human activity recognition on smartphones using a multiclass hardware-friendly support vector machine // 4th Workshop (International) on Ambient Assisted Living and Home Care (IWAAL 2012) Proceedings. — Vitoria-Gasteiz, Spain: Springer, 2012. Vol. 7657. P. 216–223.
18. Nabney I. NETLAB: Algorithms for pattern recognitions. — Springer-Verlag, 2002.
19. Deep learning class library. <https://github.com/zellyn/deeplearning-class-2011/tree/master/ufldl/library>.
20. Deep neural network tools. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42853-deep-neural-network>.
21. Matlab/Octave toolbox for deep learning. <https://github.com/rasmusbergpalm/DeepLearnToolbox>.

Поступила в редакцию 25.05.15

BUILDING SUPERPOSITION OF DEEP LEARNING NEURAL NETWORKS FOR SOLVING THE PROBLEM OF TIME SERIES CLASSIFICATION

M. S. Popova¹ and V. V. Strijov²

¹Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russian Federation

²Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: This paper solves the problem of time series classification using deep learning neural networks. The paper proposes to use a multilevel superposition of models belonging to the following classes of neural networks: two-layer neural networks, Boltzmann machines, and autoencoders. Lower levels of superposition extract informative features from noisy data of high dimensionality, while the upper level of superposition solves the problem of classification based on these extracted features. The proposed model was tested on two samples of physical activity time series. The classification results obtained by the proposed model in the computational experiment were compared with the results which were obtained on the same datasets by foreign authors. The study showed the possibility of using deep learning neural networks for solving problems of physical activity time series classification.

Keywords: classification; time series; deep learning neural networks; model superposition; feature extraction

DOI: 10.14357/08696527150304

Acknowledgments

The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 13-07-00709).

References

1. Längkvist, M., L. Karlsson, and A. Loutfi. 2014. A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling. *Pattern Recognition Lett.* 42(6):11–24. doi:10.1016/j.patrec.2014.01.008.
2. Keogh, E., and M. Pazzani. 2014. A simple dimensionality reduction technique for fast similarity search in large time series databases. *Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining Proceedings*. Kyoto, Japan: Springer. 122–133.
3. Weston, J., S. Mukherjee, O. Chapelle, M. Pontil, T. Poggio, and V. Vapnik. 2000. Feature selection for SVMs. *Advances in neural information processing systems*.

- Eds. T. K. Leen, T. G. Dietterich, and V. Tresp. Denver, CO, USA: MIT Press. 13:668–674.
4. Nanopoulos, A., R. Alcock, and Y. Manolopoulos. 2001. Feature-based classification of time-series data. *Int. J. Comput. Res.* 10:49–61.
 5. Mörchen, F. 2003. Time series feature extraction for data mining using DWT and DFT. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.87.2037> (accessed March 1, 2015).
 6. Hinton, G. E., and R. R. Salakhutdinov. 2006. Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science* 313(5786):504–507.
 7. Estévez, P. A., M. Tesmer, C. A. Perez, and J. M. Zurada. 2009. Normalized mutual information feature selection. *IEEE Trans. Neural Networks* 20(2):189–201.
 8. Stuhlsatz, A., J. Lippel, and T. Zielke. 2012. Feature extraction with deep neural networks by a generalized discriminant analysis. *IEEE Trans. Neural Networks Learning Syst.* 23(4):596–608.
 9. Ren, Y., and Y. Wu. 2014. Convolutional deep belief networks for feature extraction of EEG signal. *Joint Conference (International) on Neural Networks (IJCNN 2014) Proceedings*. Beijing, China: IEEE. 2850–2853.
 10. Xu, Y., T. Mo, Q. Feng, P. Zhong, M. Lai, and C. Chang. 2014. Deep learning of feature representation with multiple instance learning for medical image analysis. *Conference (International) on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2014) Proceedings*. Florence, Italy: IEEE. 1626–1630.
 11. Hinton, G. E., L. Deng, D. Yu, G. E. Dahl, A. Mohamed, N. Jaitly, A. Senior, V. Vanhoucke, P. Nguyen, T. N. Sainath, and B. Kingsbury. 2012. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups. *IEEE Signal Process. Mag.* 29(6):82–97.
 12. Hüskens, M., and P. Stagge. 2003. Recurrent neural networks for time series classification. *Neurocomputing* 50:223–235.
 13. Wulsin, D., J. Gupta, R. Mani, J. Blanco, and B. Litt. 2011. Modeling electroencephalography waveforms with semi-supervised deep belief nets: Faster classification and anomaly measurement. *J. Neural Eng.* 8:1741–2552.
 14. Bengio, Y. 2009. Learning deep architectures for AI. *Foundations Trends Machine Learning* 2(1):1–127.
 15. Hinton, G. E. 2012. A practical guide to training restricted boltzmann machines. *Neural networks: Tricks of the trade*. 2nd ed. Springer. 599–619.
 16. Kwapisz, J. R., G. M. Weiss, and S. Moore. 2010. Activity recognition using cell phone accelerometers. *SIGKDD Explorations* 12(2):74–82.
 17. Anguita, D., A. Ghio, L. Oneto, X. Parra, and J. L. Reyes-Ortiz. 2012. Human activity recognition on smartphones using a multiclass hardware-friendly support vector machine. *4th Workshop (International) on Ambient Assisted Living and Home Care (IWAAL 2012) Proceedings*. Vitoria-Gasteiz, Spain: Springer. 7657:216–223.
 18. Nabney, I.. 2002. *NETLAB: Algorithms for pattern recognitions*. Springer-Velag. 420 p.
 19. Deep learning class library. Available at: <https://github.com/zellyn/deeplearning-class-2011/tree/master/ufldl/library> (accessed March 1, 2015).

20. Deep neural network tools. Available at: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42853-deep-neural-network> (accessed March 1, 2015).
21. Matlab/Octave toolbox for deep learning. Available at: <https://github.com/rasmusbergpalm/DeepLearnToolbox> (accessed March 1, 2015).

Received May 25, 2015

Contributors

Popova Maria S. (b. 1994)—student, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russian Federation; maria.popova@phystech.edu

Strijov Vadim V. (b. 1967)—Doctor of Science in physics and mathematics, leading scientist, Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; strijov@ccas.com

ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ*

A. A. Грушо¹, Н. А. Грушо², Е. Е. Тимонина³, С. Я. Шоргин⁴

Аннотация: Работа посвящена исследованию возможности построения безопасных архитектур для динамически меняющихся распределенных информационных систем (ИС), в которых наряду с цennыми информационными ресурсами (ИР) могут быть высокорисковые компоненты. Построен процесс последовательного синтеза безопасной архитектуры, при котором достигается компромисс с исходными требованиями по безопасности. Автоматически достигается непротиворечивость требований частных политик безопасности и политики безопасности в интегрированной системе. Практически предлагаются методология построения защищенной ИС из небезопасных компонентов. В работе применяются элементы известных политик безопасности: Multilevel Security (MLS), Role Based Access Control (RBAC) и др. По возможности используются известные механизмы и протоколы безопасности, доверие к которым определяет доверие ко всей системе. В построенной безопасной архитектуре необходимо использовать дополнительные механизмы безопасности — серверы безопасности. Функционал некоторых видов серверов безопасности строится стандартными методами. В тех случаях, когда необходим анализ семантики, требования к серверу безопасности повышаются.

Ключевые слова: информационная безопасность информационной системы; ценные информационные ресурсы; политики безопасности; архитектура распределенной информационной системы

DOI: 10.14357/08696527150305

1 Введение

В работе рассмотрены проблемы архитектуры информационной безопасности (ИБ), связанные с функционированием как распределенных ИС, так и отдельных компьютеров. Представленный материал не претендует на полноту, но

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 15-07-02053).

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

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, info@itake.ru

³ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, eltimon@yandex.ru

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

позволяет понять границы традиционной архитектуры подсистемы ИБ, в особенности в условиях динамических изменений, характерных для современных информационных технологий (ИТ).

Под архитектурой ИБ компьютерной системы (КС) будем понимать взаимосвязь принципов, средств и методов обеспечения ИБ, которые могут позволить обосновать состояние защищенности ИС и находящихся в них ИР [1].

Под проблемами архитектуры ИБ понимаются те проблемы, которые не позволяют говорить о состоянии защищенности, несмотря на наличие необходимого спектра средств и методов защиты информации.

2 Модели архитектур распределенных систем

Компьютерную систему будем представлять в виде отдельных компьютеров, серверов, сетевого оборудования, кластеров, объединенных в сеть.

Традиционная иерархическая декомпозиция компьютера состоит из трех уровней:

- (1) верхний уровень — приложения;
- (2) средний уровень — операционная система;
- (3) нижний уровень — аппаратная платформа.

Другим примером иерархической декомпозиции является функциональная иерархическая декомпозиция КС [2]. На нижнем уровне находятся хосты сети, в которых есть ИР и которые проводят обработку имеющейся информации. На втором уровне находятся задачи, представляющие собой совокупность функций сбора информации из различных хостов, алгоритмы и программы решения задачи на основе собранной информации, а также функции распределения информации, полученной в результате решения задачи. На третьем уровне находятся ИТ, представляющие собой последовательности решаемых задач.

Широко известен пример иерархической декомпозиции взаимодействия открытых систем [3, 4].

Информационная система не является статическим объектом и в ходе своего функционирования претерпевает изменения:

- появляются новые ИТ или изменяются существующие;
- появляются новые задачи или изменяются существующие;
- появляется новое программное обеспечение или обновляется старое;
- появляются новые узлы в сети или прекращает работу часть существующих узлов;
- появляются новые ИР или модифицируются либо уничтожаются старые; изменяется ценность ИР;
- изменяются конфигурации программного обеспечения и сети;

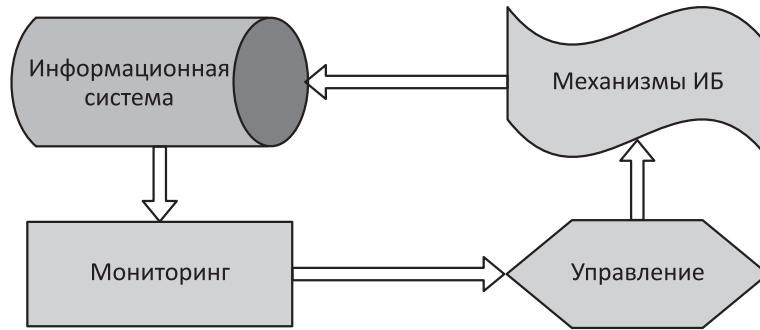


Рис. 1 Архитектура подсистемы ИБ

- возникают сбои или инциденты ИБ;
- возникают новые пользователи и появляются новые политики безопасности или изменяются старые.

В изменяющейся ИС ИБ строится на основе архитектуры, представленной на рис. 1.

Перечисленные выше изменения в ИС могут повлиять на состояние защищенности. Это влияние отслеживается системой мониторинга на основании событий безопасности и изменений, возникающих в различных частях ИС. Система мониторинга собирает информацию и передает ее для анализа, позволяющего выявить реализацию потенциальных угроз и выбрать меры для предотвращения или минимизации ущерба. Реализация мер по защите информации осуществляется с помощью механизмов безопасности, которые взаимодействуют собственно с функционалом ИС, предотвращая или компенсируя возможности нанесения ущерба.

Динамическая схема, показанная на рис. 1, может быть реализована в локальном или глобальном варианте. Локальный вариант предусматривает создание диаграммы, отраженной на рис. 1, для локального фрагмента ИС с использованием при этом локального анализатора событий и локальных механизмов безопасности. Примером локальной реализации схемы рис. 1 служит блокирование работы криптографического устройства в случае сбоя работы алгоритма шифрования.

Примерами глобальной системы являются SIEM-системы (Security Information and Event Management systems) (см., например, [5]). SIEM-системы собирают и анализируют данные из различных источников, а именно: от агентов мониторинга (сенсоров), межсетевых экранов, маршрутизаторов, серверов, КС — и обеспечивают поддержку решений, основываясь на прогнозе неблагоприятных явлений. Эти системы позволяют в реальном времени отвечать на атаки или адаптировать конфигурацию ИС для принятия контрмер.

3 Проблемы архитектур информационной безопасности компьютерных систем

3.1 Принцип наследования

В работе [2] приведен пример безопасной архитектуры, где безопасность обеспечивается запретами взаимодействий множества рисковых хостов и множества хостов с ценными ресурсами. Такое определение безопасности позволило доказать безопасность задач, строящихся на допустимых взаимодействиях, и безопасность ИТ. Вместе с тем динамика этой модели приводит к интересным результатам. Пусть хост, не относящийся к рисковым или ценным хостам, начинает взаимодействовать с рисковым хостом (такое взаимодействие разрешено). Тогда такой хост необходимо добавить к множеству рисковых хостов, так как взаимодействие с рисковым хостом содержит угрозу проникновения вредоносного кода или враждебного воздействия. Аналогично, если хост не относится к рисковым или ценным хостам, но получил ценный ИР, то он становится ценным хостом. Таким образом, возникает принцип наследования при взаимодействии с рисковыми или ценными хостами.

Последовательное применение этого принципа приводит к тому, что безопасная система делится на два непересекающихся множества: рисковых и ценных хостов, взаимодействие между которыми запрещено.

Если разбить двухсторонние взаимодействия на односторонние взаимодействия, то системы, в которых разрешены передачи ИР к ценным хостам, можно отнести к системам с политикой MLS [4]. Системы, в которых запрещены информационные потоки от рисковых хостов, но разрешены потоки к ним, удовлетворяют политике Байба защиты целостности [4]. Совместное применение многоуровневых политик безопасности MLS и политик Байба приводит к разбиению ИС на изолированные подсистемы (кроме частного случая гибридных политик безопасности [6]).

В настоящее время сетей, в которых взаимодействия являются односторонними на всех уровнях иерархической декомпозиции, не существует. Даже если разрешена и реализована передача прикладной информации только в одном направлении, интерактивное взаимодействие в протоколах нижнего уровня исключить невозможно. Понятно, что разбиение ИС на изолированные компоненты эквивалентно созданию независимых ИС, не взаимодействующих друг с другом.

Таким образом, при строгих ограничениях на взаимодействия безопасность единой ИС может достигаться только в тех случаях, если ИС разбивается на изолированные подсистемы.

3.2 Проблемы иерархической декомпозиции реализаций функций безопасности

Политика безопасности формируется в форме правил, написанных на некотором языке. Этот язык оперирует объектами, относительно которых должны

выполняться определенные требования ИБ с целью недопущения ущерба этим объектам и всей ИС.

Однако проверка выполнения требований политики безопасности, записанных на определенном языке, предполагает интерпретацию этого языка на более низких уровнях иерархической декомпозиции КС. Это требование вытекает из того, что язык, понимаемый процессором, отличен от языка описания требований политики безопасности.

Вместе с изменением языков описания требований политики безопасности на более низких уровнях КС изменяются описания объектов, к которым эти требования применяются.

Как правило, на более низком уровне иерархии сложные функции верхнего уровня распадаются на множество более простых функций нижнего уровня. При этом совокупность вычислений на нижнем уровне иерархии должна обеспечивать вычисление сложных функций более высокого уровня. Это приводит к тому, что механизмы, реализующие функции безопасности на нижнем уровне, не всегда могут обеспечить отражение содержания функций верхнего уровня (или выражений языка верхнего уровня). Например, межсетевой экран отфильтровывает информацию на основе синтаксических признаков, в то время как ценность информации содержится в ее семантике. Отсюда следует, что через межсетевой экран всегда можно передать информацию, отвечающую допустимым требованиям по синтаксису, но содержащую запрещенную к передаче информацию, содержащуюся в семантике.

С точки зрения авторов статьи сделанное замечание отражает основную проблему построения защищенных ИС.

Для того чтобы избежать этой проблемы ИБ, политику безопасности строят так, чтобы ее можно было выразить на языке описания функций простых механизмов ИБ. Например, в [2] политика безопасности ИС формулируется в терминах разрешения или запрещения взаимодействий хостов. Разрешение или запрещение взаимодействия — это просто реализуемые функции, которые не используют семантику информации, присутствующую в задачах и ИТ.

Таким образом, приходим к противоречию между необходимостью использования упрощенных политик безопасности и потребностью интеграции ИС, работающих со сложными семантическими объектами.

3.3 Проблемы динамики требований безопасности

В больших системах нет единого понимания защищенности. Например, в облачных вычислениях участвуют пользователи, провайдеры компьютерных услуг, провайдеры сетевых услуг. Пользователи заинтересованы в безопасности своих данных, куда входит конфиденциальность, целостность и доступность данных пользователей. Более того, например, разные пользователи, используя различные ИТ, могут предъявлять разные требования по скорости восстановления ИР при сбоях и повреждениях. При этом не совсем понятно, как можно раз-

решить возникающие противоречия при использовании облачных вычислений. Провайдер компьютерных услуг заинтересован в предоставлении качественных услуг всем пользователям, что обеспечивается прежде всего целостностью КС и эффективным управлением ресурсами. Сетевой провайдер под безопасностью понимает конфиденциальность и целостность передаваемой по каналам информации. Отсюда, несмотря на общность используемых понятий для каждого из участников, следует, что требования к безопасности у КС-провайдера не пересекаются, а может быть, и противоречат требованиям к ИБ пользователя или сетевого провайдера.

Различные требования по безопасности, а тем более противоречия в таких требованиях значительно усложняют настройки и работу механизмов безопасности, которые поддерживают эти политики безопасности. Сложность проблемы настройки механизмов безопасности увеличивается с учетом динамики изменения конфигурации распределенной КС. Часть пользователей отключается, а часть подключается к КС, требуя изменения конфигурации механизмов безопасности. Поддержка КС облачных вычислений также требует динамичного изменения своего состава и модернизации программного обеспечения.

Таким образом, возникает проблема непротиворечивости и полноты обеспечения ИБ в каждый конкретный момент времени и проблема динамической безопасной переконфигурации ИС.

3.4 Проблемы реализации глобальной и локальной информационной безопасности

Приведенные выше примеры показывают, насколько трудно определить понятие защищенности распределенной ИС и поддерживающей ее распределенной КС. Проще определить локальную ИБ компьютера, задачи (приложения) и/или ИТ.

Из соображений необходимости обеспечения глобального управления ИБ и непротиворечивости и полноты безопасности изменяющихся конфигураций ИС и/или КС вытекает важность определения глобальной защищенности ИС и/или КС. Отсюда возникает задача нахождения таких решений (алгоритмов) по построению безопасных архитектур ИС и КС, которые могли бы сочетать решения глобальных и локальных задач ИБ.

3.5 Проблема плавной деградации информационной системы

Устойчивость сохранения функционала ИС при сбоях и повреждениях приводит к понятию плавной деградации системы [7]. Под этим понятием подразумевается следующее. Необходимо выделить наиболее важный функционал ИС, который должен поддерживаться в условиях сбоев и ошибок в ИС. Вместе с тем пользователи больших систем накладывают ограничения по времени на выполнение задач, решаемых ими с помощью ИС и КС. Как показано в [7], требования

устойчивости к сбоям и требования ограничений по времени противоречат друг другу.

В связи с тем, что точки появления сбоев и повреждений в КС и ИС не прогнозируются, необходимо иметь возможность резервирования и быстрой переконфигурации ИС и КС.

3.6 Проблема мониторинга информационной безопасности

Как было отмечено в п. 3.4, для решения задач переконфигурации необходим глобальный мониторинг информационной безопасности ИС и КС. Вместе с тем очевидно, что механизмы мониторинга на разных уровнях иерархической декомпозиции системы могут быть реализованы только различными способами, а на некоторых уровнях иерархии (аппаратная платформа) такой мониторинг практически не осуществим. Таким образом, данные мониторинга являются неструктуризованными, что затрудняет их анализ.

Можно бесконечно увеличивать число агентов мониторинга ИС и КС, однако практически необходимо решать задачи распределения агентов мониторинга и анализа получаемой с их помощью информации об инцидентах ИБ с помощью систем искусственного интеллекта.

4 Теория компромиссов

Для того чтобы разрешать противоречия, описанные выше, необходимо создать механизм, позволяющий нарушать требования политики безопасности и в то же время сохранять систему безопасной. Возможность существования такого механизма была отмечена ранее в п. 3.2 и сводится к тому, что более «тонкое» исследование потребности и содержания запрошенного, но отвергнутого взаимодействия может позволить нарушить запрещающее правило.

Случай возможного нарушения правил политики безопасности с сохранением ИБ будем называть компромиссом. Примеры компромиссов существуют в практике ИБ КС. В частности, в политике RBAC (role-based access control) [8] вводится полурешетка привилегий, в которой запрещенное взаимодействие может быть разрешено ролью, которая является наименьшей верхней гранью [4] для объектов, запросивших запрещенное взаимодействие. Недостатком этой модели является то, что разрешение на компромиссное взаимодействиедается пользователем, исполняющим соответствующую роль. Существуют и другие примеры поиска компромиссов.

В данной работе используется модель, определяемая не ролями пользователей, а иерархической декомпозицией ИС или КС [2].

Представим ИС в виде множества компонентов L . Компонентами могут быть хосты сети, ценные ИР на хостах, задачи (приложения), ИТ и др. [2]. Напомним, что задача состоит из данных, собираемых для ее решения, программ для решения задачи и системы распределения информации о результатах решения задачи.

Информационная технология представляет собой последовательность решаемых задач. К компонентам ИС можно отнести сетевое оборудование и механизмы обеспечения ИБ. Взаимодействие ИС с подсистемой ИБ осуществляется в соответствии с рис. 1. Из принципа наследования (см. п. 3.1) все компоненты разделены на ценные и высокорисковые компоненты.

Как и в [2], определим понятие взаимодействия компонентов системы. Под взаимодействием понимается передача ИР от одного компонента к другому. Любое взаимодействие компонентов между собой можно представить в виде иерархической декомпозиции, а именно: взаимодействие ИТ сводится к взаимодействию задач; взаимодействие задач сводится к взаимодействию хостов, на которых решаются эти задачи; а взаимодействие хостов представляет собой передачу ИР через сеть. Таким образом, граф возможных взаимодействий компонентов может быть представлен в виде иерархической декомпозиции графов взаимодействия хостов [9].

Политику безопасности для ИС, обеспечивающую безопасность взаимодействий, можно сформулировать в терминах разрешенных и запрещенных взаимодействий хостов. Например, для иерархии «хост–задачи–ИТ» в работе [2] показана непротиворечивость такого задания политики безопасности. Запрет на взаимодействие [2] определялся попаданием ценного ИР в высокорисковый компонент. При этом хост считался ценным, если в нем содержался хотя бы один высокооцененный ИР, и высокорисковым, если из другого высокорискового хоста была передана какая-либо информация.

Пусть в ИС базовая политика безопасности состоит в том, что взаимодействие рисковых компонентов и ценных компонентов запрещено. Тогда согласно принципу наследования (см. п. 3.1) соблюдение такой политики безопасности возможно, когда ИС разбивается на две независимые ИС. Будем называть их L_1 и L_2 . Кроме базовой политики в каждой из систем L_1 и L_2 могут действовать свои внутренние политики безопасности, например дискреционная политика [4], RBAC и т. д. Структура и конфигурация каждой из систем L_1 и L_2 может меняться независимо друг от друга, а именно: может меняться программное обеспечение, множество компонентов в каждой системе, могут меняться конфигурации и настройки. Системы ИБ в L_1 и L_2 построены в соответствии с рис. 1. Таким образом, первоначально ИС состоит из двух изолированных систем, которые представлены на рис. 2, где М — центр мониторинга, У — центр анализа и управления соответствующими ИС L_1 и L_2 .

Исследуем возможные пути интеграции L_1 и L_2 таким образом, чтобы базовая политика безопасности не менялась, а политики безопасности в каждой из систем не влияли друг на друга. Сначала интегрируем системы L_1 и L_2 на базе общей сети. На рис. 3 МЭ обозначает межсетевой экран. Как видно из рис. 3, единая сеть систем L_1 и L_2 предполагает их взаимодействие.

Рассмотрим возможности сделать такое взаимодействие безопасным с точки зрения базовой политики безопасности и политик безопасности L_1 и L_2 . Межсетевые экраны не допускают прохождения пакетов, в которых адрес отправ-

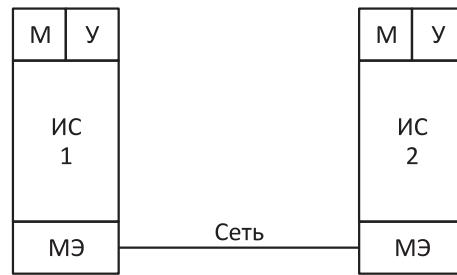
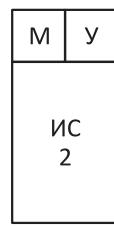
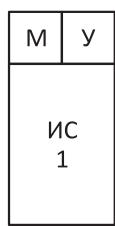


Рис. 2 Представление ИС после применения принципа наследования

Рис. 3 Интеграция ИС на уровне сети

вителя и адрес получателя принадлежат разным системам L_1 и L_2 . При таком взаимодействии возникают следующие угрозы:

- *подмена адреса.* Для защиты от этой угрозы можно использовать протокол AH (Authentication Header), который является составной частью стандартного протокола IPsec. Этот протокол реализует электронную подпись заголовка, позволяющую на МЭ отбросить пакеты с недопустимыми адресами;
- *несанкционированное чтение.* В единой сети можно предположить наличие точек, в которых злоумышленник может перехватывать пакеты с ценной информацией. Для защиты от этой угрозы используется шифрование, при этом можно использовать стандартное распределение ключей протокола IPsec;
- *модификация пакетов.* Для защиты целостности содержимого пакетов можно использовать MAC (Message Authentication Code) или электронную подпись.

Ясно, что в рамках одной сети компоненты системы L_1 получают информацию об IP-адресах системы L_2 и наоборот. В связи с этим следует сделать допущение, что системы адресов L_1 и L_2 не содержат ценной информации и поэтому доступ к такой информации не является нарушением базовой политики безопасности. Таким образом, можно создать безопасное сетевое взаимодействие, не нарушающее базовую политику безопасности и политику безопасности каждой из систем.

Утверждение 1. *При наличии доверия к межсетевым экранам и встроенным в них криптошлюзам возможно выполнение базовой политики безопасности ИС и произвольных политик безопасности в каждой из систем L_1 и L_2 , несмотря на изменения в их структуре и конфигурациях.*

Следующим этапом интеграции L_1 и L_2 является построение безопасного мониторинга и управления единой ИС $L = L_1 \cup L_2$. Задачами единой системы мониторинга являются:

- сбор информации о компонентах ИС L , их потребностях и их работоспособности;

- сбор данных о сбоях, ошибках и занятости программно-аппаратных систем ИС L ;
- сбор данных о событиях безопасности в ИС L .

Задачи упрощаются, если в каждой системе и существуют свои системы мониторинга, как показано на рис. 2 и 3. Проблема построения единой системы мониторинга состоит в том, что создается некоторая ИС L_3 (рис. 4), не входящая в L_1 и L_2 , но через которую возможно взаимодействие компонентов L_1 и L_2 . Отметим, что для создания такого безопасного взаимодействия не подходят механизмы криптографической защиты.

Основная идея предлагаемого подхода состоит в том, чтобы создать достаточно бедный язык, описывающий данные мониторинга. Этот язык должен быть настолько беден, чтобы исключить возможность описания на нем ценных ИР или избежать внедрения в его выражения вредоносного кода и враждебных воздействий. С другой стороны, такой язык должен быть достаточно богатым для того, чтобы отражать весь спектр событий, подлежащих мониторингу.

Построение такого языка основано на принципах построения формализованных сообщений. Семантика этого языка может быть достаточно богатой и кодироваться значениями заданного конечного множества атрибутов. Тогда сообщения мониторинга представляют собой конечное множество пар «атрибут–значение». На приемном конце системы мониторинга стоят сервер безопасности 1 (Себ 1) и сервер безопасности 2 (Себ 2), в задачи которых входит проверка правильности формата сообщения и принадлежности значений соответствующих атрибутов своим областям значений. При этом передача по сети также должна удовлетворять требованиям по безопасности, о которых говорилось ранее. Предложенный подход известен при контроле целостности баз данных. Все сообщения мониторинга должны проходить контроль аутентификации агентов мониторинга.

Угрозы вредоносного воздействия на единую систему мониторинга:

- задержка или уничтожение сообщения;
- повтор сообщения мониторинга в другое время;

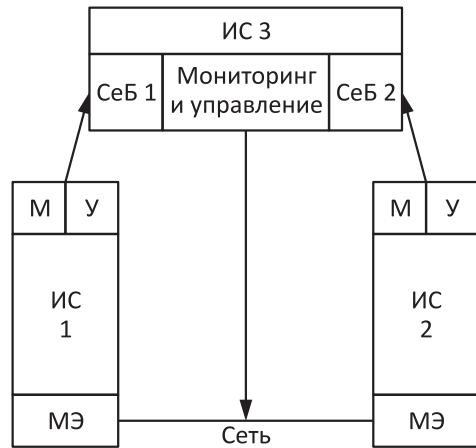


Рис. 4 Интеграция ИС на уровне сети и единого мониторинга и управления

- имитация событий мониторинга («маскарад»);
- создание потока сообщений, инициирующего DoS (Denial of Service).

В случае наличия систем мониторинга в каждой из ИС L_1 и L_2 данные единого мониторинга можно получать из этих подсистем, как и дополнительные сообщения о работе системы связи, межсетевых экранов, криптографии в межсетевых экранах и сетевого оборудования.

Отметим, что во всех рассмотренных случаях ценные ИР в единую систему мониторинга не поступают. Однако по умолчанию считается, что директории, индексы и другие перечни ресурсов не несут ценной информации. Аналогично допускается, что директории, индексы и другие перечни ресурсов, формирующиеся в базе данных единой системы мониторинга по информации из рисковых компонентов, не могут содержать вредоносный код и реализовать вредоносное воздействие.

Угрозы сообщениям мониторинга можно нейтрализовать, используя временные метки, избыточность системы мониторинга и методы блокирования компонентов, генерирующих избыточные потоки сообщений мониторинга.

Утверждение 2. *При доверии к сети можно обеспечить безопасность единой системы мониторинга на основе создания достаточно бедного языка, позволяющего предотвратить утечку ценных ИР в систему мониторинга и не допустить проникновения в нее вредоносного кода и вредоносного воздействия.*

Анализ данных мониторинга и формирование управляющих воздействий осуществляется на основе поступивших и поступающих сообщений мониторинга о состоянии системы и событиях безопасности. При этом бедность языка в единой системе мониторинга компенсируется богатством базы данных семантики и возможностями системы анализа и управления затребовать дополнительную информацию о компонентах. Запросы должны формулироваться на языке, доступном для понимания агентами мониторинга. При этом предполагается, что ответы на запросы также выражаются на языке единой системы мониторинга. Запросы могут направляться в те компоненты ИС, получение информации от которых может позволить уточнить состояние ИС и ее безопасность. Отметим, что при этом также не нарушается базовая политика безопасности и политики безопасности каждой из систем L_1 и L_2 .

Управляющие воздействия в единой системе управления могут быть написаны на любом богатом языке, так как источником таких сообщений является доверенная система управления ИС L_3 . Очевидно, что если система управления L_3 скомпрометирована, то существует такая конфигурация компонентов и сетевого оборудования, что возможна утечка ценных ИР и проникновение вредоносного кода и враждебных воздействий. Если считать, что сбор мониторинговой информации не нарушает безопасность ИС L_3 , то одностороннее распределение управляющей информации практически реализует политику безопасности Байба [2] защиты целостности ИС L_3 .

Центральным вопросом в интеграции систем L_1 и L_2 является такое использование ИР обеих систем, что не нарушается базовая политика безопасности и политики безопасности систем L_1 и L_2 , но при этом допускается возможность компромисса, не снижающего безопасность интегрированной системы. С этой целью предлагается решение, основанное на организации временных изолированных доменов (ВИД), в которых четко определены точки возникновения компромиссов (рис. 5).

Обозначим через Z задачу или ИТ в L_1 или L_2 . Предположим, что для выполнения Z необходимы ресурсы как L_1 , так и L_2 . Например, необходимо решить задачу с использованием ценных ИР с помощью программного обеспечения, взятого из Интернета. Компонент Z , для определенности принадлежащий L_1 , инициирует создание ВИД. С этой целью через единую систему мониторинга задачей Z подается запрос на создание ВИД и необходимые ресурсы ИС L_2 . После создания ВИД $D(Z)$ система управления информирует Z и другие компоненты L_1 , L_2 о необходимости передачи требуемых ресурсов домену $D(Z)$. Одновременно создается система мониторинга $D(Z)$. Процесс решения задачи Z или выполнение ИТ Z в ВИД контролируется системой мониторинга ВИД так же, как и для L_1 , L_2 .

В результате мониторинга система управления может исправлять, пополнять, переконфигурировать программное обеспечение в $D(Z)$. Отметим, что взаимодействие каждой из систем L_1 , L_2 с ВИД $D(Z)$ допускается только в одну сторону — к ВИД, т. е. в ВИД могут поступать любые ИР из L_1 и L_2 , но обратное движение информации к L_1 и L_2 от ВИД запрещено.

Результаты выполнения задачи Z в $D(Z)$ поступают в Себ 3 и через него в другие компоненты единой ИС. Себ 3 играет центральную роль во всей схеме. Он решает следующие задачи:

- при необходимости передачи информации в ИС с цennыми ИР Себ 3 проверяет наличие вредоносного кода и средств вредоносного воздействия. По результатам этого анализа информация из $D(Z)$ может быть распределена в компоненты с цennыми ИР или такая передача признана недопустимой;
- если информация из $D(Z)$ предназначена для высокорисковой подсистемы, то Себ 3 ищет признаки наличия ценной информации. Если по правилам безопасности, заложенным в Себ 3, таких признаков не обнаружено, то

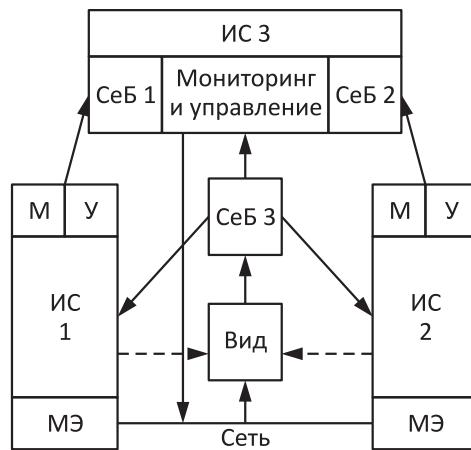


Рис. 5 Интегрированная ИС

информация передается в высокорисковый компонент. В противном случае Себ З через систему управления может потребовать изъятия ценной информации.

При использовании ВИД выполняются требования базовой политики безопасности. В самом деле, отсутствуют прямые взаимодействия между системами L_1 и L_2 . При организации ВИД могут быть использованы ИР как L_1 , так и L_2 . Центральное место в обеспечении безопасности при компромиссах отводится серверам безопасности. Наиболее сложной представляется реализация Себ З, который должен анализировать результат выполнения задачи или ИТ при распределении информации по другим компонентам.

Для некоторых классов задач задача проверки наличия вредоносного кода может решаться достаточно просто, если выходная информация носит формализованный характер. Для качественной проверки наличия ценной информации в выходных данных ВИД может потребоваться сложный семантический анализ (см. п. 3.2). Отметим, что ВИД по истечении надобности должен быть уничтожен для предотвращения нарушения целостности, связанного с проникновением в ВИД вредоносного кода и враждебных воздействий.

5 Заключение

Работа развивает положения статьи [2]. Проводятся исследования непротиворечивости построения безопасных архитектур в условиях, когда допускается обмен ценными ИР с другими компонентами и допускается возможность создания новых ценных ИР с использованием высокорисковых компонентов. В решении задачи динамического изменения ИР основная роль построения безопасной архитектуры отводится понятию компромисса. Представлен пример реализации компромисса при сохранении защищенности в компонентах ценных ИР и недопустимости проникновения вредоносного кода и враждебных воздействий в эти компоненты.

С использованием иерархических декомпозиций ИС намечена методология синтеза безопасных архитектур. Методология сводится к последовательному формированию безопасной архитектуры с оценкой эффективности средств и методов ИБ ее построения, начиная с нижних уровней иерархической декомпозиции ИС.

В представленном примере безопасной архитектуры динамически изменяющейся ИС существенную роль сыграли существующие в настоящее время и широко используемые политики безопасности. В частности, ВИД построен на принципах MLS. При этом Себ З, как и в модели Белла–Лападула [4], играет роль доверенного субъекта. В подсистемах L_1 и L_2 могут использоваться дискреционные политики безопасности [4] и политики RBAC, при этом безопасная архитектура единой ИС построена таким образом, чтобы не нарушались правила этих политик безопасности в системах L_1 и L_2 .

Легко видеть, что предложенный в работе метод переносится на произвольное число систем, работающих с различными типами ценной информации. Кроме того, одновременно может создаваться несколько ВИД.

В дальнейшем предполагается исследовать пути и сложность построения серверов безопасности, а также оценить стойкость решения возложенных на них задач.

Литература

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации (утв. Президентом РФ от 9 сентября 2000 г. № Пр-1895). <http://www.scrf.gov.ru/documents/5.html>.
2. Грушо А., Грушо Н., Тимонина Е., Шоргин С. Безопасные архитектуры распределенных систем // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 3. С. 18–31.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Ч. 1. Базовая модель. — М.: Госстандарт России, 1999. 62 с.
4. Грушо А., Применко Э., Тимонина Е. Теоретические основы компьютерной безопасности. — М.: Академия, 2009. 272 с.
5. Prelude: A CS product. 2012. <http://www.prelude-siem.com/index.php/uk/>.
6. Грушо А., Тимонина Е. Гибридные политики безопасности // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации: Тезисы докладов науч.-технич. конф. — СПб.: СПбГТУ, 1996. С. 87.
7. McLean J., Heitmeyer C. High assurance computer systems: A research agenda. — Washington, DC, USA: Center for High Assurance Computer Systems Naval Research Laboratory, 1995. P. 1–20.
8. Sandhu R., Ferraiolo D. F., Kuhn D. R. The NIST model for role based access control: Toward a unified standard // 5th ACM Workshop on Role-Based Access Control Proceedings, 2000. P. 47–63.
9. Топольский Н. Г., Святенко И. Ю., Трефилов Г. Б., Сатин А. П. Алгоритмы многоуровневой иерархической декомпозиции гиперграфовых и графовых моделей причинно-следственных связей в АСУ безопасностью критически важных объектов // Технологии техносферной безопасности: Научный интернет-журнал, 2009. Вып. 5 (27). 12 с. <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-5/12-05-09.ttb.pdf>.

Поступила в редакцию 12.08.15

POSSIBILITIES OF SECURE ARCHITECTURE CREATION FOR DYNAMICALLY CHANGING INFORMATION SYSTEMS

A. A. Grusho¹, N. A. Grusho¹, E. E. Timonina¹, and S. Ya. Shorgin²

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

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

Abstract: The paper is devoted to research of existence of information system security architecture. The authors assume dynamical changes in the distributed information system in which along with valuable information resources, there can be high-risk components. Process of consecutive synthesis of secure architecture at which there is the compromise with initial requirements for security is constructed. Consistency of requirements of local security policies and a security policy in the integrated system is automatically reached. The methodology of creation of the protected information system with unsecure components is suggested in practice. In the paper, the elements of known security policies are applied: Multilevel Security (MLS), Role-Based Access Control (RBAC), etc. Known mechanisms and security protocols which define the trust to the whole system are used whenever it is possible. In the constructed secure architecture, it is necessary to use additional mechanisms of security — security servers. Functionalities of some types of security servers are constructed by standard methods. When the analysis of semantics is necessary, the requirements to the security server raise.

Keywords: information security of information system; valuable information resources; security policies; architecture of the distributed information system

DOI: 10.14357/08696527150305

Acknowledgments

The paper was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-07-02053).

References

1. Doktrina informatsionnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii (utv. Prezidentom RF ot 9 sentyabrya 2000 g. N Pr-1895) [The doctrine of information security of the Russian Federation (No. 1895 approved by the Russian President at September 9, 2000)]. Available at: <http://www.scrf.gov.ru/documents/5.html> (accessed October 19, 2015).
2. Grusho, A., N. Grusho, E. Timonina, and S. Shorgin. 2014. Bezopasnye arkhitektury raspredelenykh sistem [Secure architecture of the distributed systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(3):18–31.

3. ISO / IEC 7498-1-99. 1999. *Vzaimosvyaz' otkrytykh sistem. Bazovaya etalonnaya model'*. Ch. 1. *Bazovaya model'* [Interrelation of open systems. Basic reference model. Pt. 1. Basic model]. Moscow: Gosstandart of Russia. 62 p.
4. Grusho, A., E. Primenko, and E. Timonina. 2009. *Teoreticheskie osnovy kompyuternoy bezopasnosti* [Theoretical bases of computer security]. Moscow: Academy. 272 p.
5. Prelude: A CS product. 2012. Available at: <http://www.prelude-siem.com/index.php/uk/> (accessed October 19, 2015).
6. Grusho, A., and E. Timonina. 1996. Gibridnye politiki bezopasnosti [Hybrid security policies]. *Tezisy dokladov konf. "Metody i tekhnicheskie sredstva obespecheniya bezopasnosti informatsii"* [Abstracts of the Conference "Methods and Technical Means of Information Security"]. SPb.: Publishing House SPbSTU. 87.
7. McLean, J., and C. Heitmeyer. 1995. High assurance computer systems: A research agenda. Washington, DC: Center for High Assurance Computer Systems Naval Research Laboratory. 1–20.
8. Sandhu, R., D. F. Ferraiolo, and D. R. Kuhn. 2000. The NIST model for role based access control: Toward a unified standard. *5th ACM Workshop Role-Based Access Control Proceedings*. 47–63.
9. Topolskiy, N. G., G. B. Trefilov, and A. P. Satin. Oct. 2009. Algoritmy mnogourovnevoy ierarkhicheskoy dekompozitsii gipergrafovyykh i grafovyykh modeley prichinno-sledstvennykh svyazey v ASU bezopasnost'yu kriticheski vazhnykh ob'ektov [Algorithms of multilevel hierarchical decomposition hypergraph and graph models of relationships of cause and effect in the management information system safety of crucial objects]. *Internet-zhurnal "Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti"* [Technologies of a Technosphere Safety Internet J.] 5(27):1–12. <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-5/12-05-09.ttb.pdf> (accessed October 15, 2015).

Received August 12, 2015

Contributors

Grusho Alexander A. (b. 1946) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; grusho@yandex.ru

Grusho Nick A. (b. 1982) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; info@itake.ru

Timonina Elena E. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, professor, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; eltimon@yandex.ru

Shorgin Sergey Ya. (b. 1952) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Deputy Director, Federal Research Center "Computer Sciences and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sshorgin@ipiran.ru

ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВРЕДОНОСНОГО КОДА И ПРОГРАММ ЗАЩИТЫ В АРХИТЕКТУРЕ СОВРЕМЕННЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ*

P. P. Гилязов¹, A. A. Грушо²

Аннотация: Рассмотрены проблемы взаимодействия вредоносного кода и защитного программного обеспечения (ЗПО) в средах современных операционных систем (ОС). В частности, рассмотрен ряд аспектов, связанных с программными модулями, предоставляющими нарушителю возможности для устойчивого и неопределенного присутствия в компьютерных системах. Сформирован ряд утверждений, говорящих о взаимоотношении технологий, используемых в ЗПО, и обеспечении «невидимости» исполняемого кода. На практике для модельного руткита (РТ) продемонстрирована возможность неопределенного присутствия для современного ЗПО. На основе анализа механизма системных вызовов и драйверной подсистемы Windows NT выработаны необходимые требования по разработке ЗПО. Построена модель случайного ограничения возможностей вредоносного программного обеспечения (ВПО) для практической реализации ЗПО без нарушения алгоритмов распределения процессорного времени.

Ключевые слова: информационная безопасность; защитное программное обеспечение; вредоносное программное обеспечение; руткит; антивирус; технологии скрытия исполняемого кода

DOI: 10.14357/08696527150306

1 Введение

Компьютерные системы, работающие под управлением ОС, предоставляют ресурсы для выполнения задач по обработке информации, являющейся ценной. Злоумышленник, используя различные методы, имеет возможность реализовать специальное программное обеспечение для захвата вычислительных ресурсов и получения несанкционированного доступа к ценной информации. Отметим, что нарушитель заинтересован в постоянном, устойчивом и неопределенном присутствии своих компонентов. Существует класс технологий, позволяющих реализовать данное ВПО и сделать его «невидимым» для защитных средств.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 15-07-02053).

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, irusrubin@gmail.com

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, grusho@yandex.ru

Статья посвящена проблеме противодействия защитного программного обеспечения ВПО. Для выявления вредоносного кода ЗПО должно решать задачи мониторинга, позволяющие выявить ВПО, т. е. ЗПО должно «увидеть» ВПО или его следы. Решение этих задач основано на наличии двух базовых компонентов в ЗПО.

Компонент А. Защитное программное обеспечение должно распознавать сле-ды ВПО, т. е. должен быть язык, на котором выражены те свойства ВПО или следов его функционирования, которые система мониторинга способна прочи-тать, чтобы получить информацию о вредоносном коде. Например, сигнатуры вирусов или вредоносного кода являются словами такого языка и сенсоры ЗПО способны идентифицировать эти сигнатуры в рассматриваемом объекте так, что подсистема анализа ЗПО по этой информации способна вывести заключение о наличии вредоносного кода. Если система мониторинга не способна прочитать информацию о том, что данный код является вредоносным, то ЗПО не может сделать вывод о наличии вредоносного кода. В этом случае обfuscация ВПО позволяет сделать его «невидимым» при статическом анализе.

Компонент В. Если есть язык, описывающий свойства ВПО и следов его функционирования, то для выявления вредоносного кода должно существовать взаимодействие сенсоров ЗПО со статическими или динамическими фрагментами ВПО. В самом деле, любые сенсоры регистрируют требуемые параметры по результатам взаимодействия с объектом наблюдения.

В определенных условиях ВПО может реализовать действия, исключающие взаимодействие с ЗПО. В этом случае можно также говорить о «невидимости» ВПО. Перечислим действия ВПО, позволяющие исключить его взаимодействие с ЗПО.

1. Использование ограниченности области мониторинга ЗПО. В этом случае ВПО переносит себя в домен, не доступный для ЗПО.
2. Вредоносное программное обеспечение использует ограниченность времени для обнаружения себя в некоторой среде. Сюда можно отнести возможности ВПО по усложнению задачи анализа взаимодействия (например, добавление «шума» в среду функционирования ЗПО).
3. Использование возможности приоритета работы ВПО для действий по своей маскировке перед началом функционирования ЗПО путем модификации данных ОС, используемых для выявления ВПО.
4. Использование информации о последовательности действий ЗПО для обхода его защитных функций.
5. Модификация информации о взаимодействии сенсоров ЗПО с ВПО. На-пример, перехват IRP-пакетов (I/O request packets) и их фильтрация.

В данной статье рассматриваются технологии обеспечения «невидимости» исполняемого кода в средах различных ОС. Реализация подобных технологий в программном коде имеет устоявшееся название — руткит (см., например, [1]).

Актуальными являются вопросы взаимоотношения ЗПО и РТ, связанные с возможностью его обнаружения.

2 Взаимоотношение технологий, используемых в защитном программном обеспечении и руткитах

Условно РТ можно классифицировать следующим образом [2]:

- стеганографические РТ;
- РТ, функционирующие в ОС;
- РТ, функционирующие вне ОС.

Стеганографические РТ в данной работе не рассматриваются.

На основе анализа программно-аппаратной архитектуры современных ОС в работе делается следующий вывод. В случае если ЗПО получило процессорные ресурсы раньше РТ и находится на уровне ниже или таком же, как и РТ, то ЗПО может детектировать РТ.

Если РТ загрузился раньше ЗПО, он может использовать перечисленные выше действия и либо блокировать загрузку ЗПО, либо создать эмуляцию отсутствия РТ относительно ЗПО. Задача идентификации РТ ЗПО идентична задаче идентификации ЗПО РТ и ЗПО ВПО в целом. Кроме того, на практике задача идентификации ЗПО проще ввиду его общедоступности и известным алгоритмам поведения.

На примере ОС двухуровневой архитектуры (Windows NT, Linux, Mac OS и т. п.) рассмотрены модификации источников данных ОС с целью воспрепятствования детектированию РТ ЗПО, функционирующих в кольце 0. Отметим, что создание полной эмуляции в данной архитектуре ОС в кольце 0 для ЗПО невозможно (как минимум для аппаратной архитектуры x86, x86-64) по причине того, что в случае получения ЗПО процессорного времени ЗПО получит доступ к процессору и сможет проанализировать оперативную память, что не может быть эмулировано РТ ввиду невозможности виртуализации таблицы векторов прерываний (Interrupt Descriptor Table — IDT).

Таким образом, для ОС двухуровневой архитектуры можно отметить, что ЗПО, работающее в кольце 0, при условии, что не нарушена его целостность и оно первым получает процессорное время, может обнаружить РТ, в случае если РТ в момент получения процессорного времени ЗПО присутствует в системе.

Обоснование этого утверждения является крайне важным для подобных архитектур, ввиду того что оно опровергает распространенную гипотезу [3–5], утверждающую, что возможно существование РТ, не обнаружимых для ЗПО, в случае более ранней загрузки РТ.

Кроме того, если не используется обfuscация, то РТ, хранящийся и/или хранящий информацию на жестком диске, детектируется путем сканирования жесткого диска средствами ОС и низкоуровневыми командами с последующим сравнением результатов двух способов.

В настоящее время используется РТ вне ОС, например возможно существование РТ, работающего на уровне гипервизора, работающего под ОС, который не может быть обнаружен ЗПО, работающим в ОС.

Отметим, что необходимы тематические исследования оборудования, в частности процессора, с целью обнаружения следов функционирования программного кода. На текущий момент известен более низкий уровень ВПО для процессора по сравнению с уровнем гипервизора — SMM (system management mode) [6, 7]. Также известно, что микрокод процессора можно обновлять [8] с целью выявления возможных мест хранения РТ (на текущий момент известны техники, эксплуатирующие видеоадаптеры, контроллеры жестких дисков [9], что выходит за рамки данной работы, но полученные результаты будут верны и для результатов данных тематических исследований).

3 Построение модельного руткита

На примере Windows NT рассмотрим, насколько эффективно ЗПО для данной ОС детектирует РТ в кольце 0. С этой целью построим модельный РТ, использующий указанные выше возможности преодоления ЗПО.

В Windows NT взаимодействие уровня пользователя и уровня ядра происходит при помощи диспетчера системных вызовов. Для вызова функций ядра используется специальная инструкция процессора `sysenter` либо прерывание `int 2E`, после чего диспетчер системных вызовов находит необходимую функцию по номеру в одном из двух дескрипторов системных сервисов: `KeServiceDescriptorTable` и `KeServiceDescriptorTableShadow`. Каждый из них содержит 4 таблицы, из которых в `KeServiceDescriptorTable` используется первая из них, а в `KeServiceDescriptorTableShadow` используются первая и вторая. Формат структуры, описывающей каждую таблицу, представлен в листинге 1.

Поле `Base` содержит указатель на таблицу адресов функций, которые вызываются при обработке системного вызова.

При создании потока поле `ServiceTable` структуры `ETHREAD.Tcb` заполняется адресом `KeServiceDescriptorTable` (см. листинг 2).

```
typedef struct SERVICE_DESCRIPTOR_ENTRY
{
    PVOID *Base;
    PULONG Count;
    ULONG Limit;
    PUCHAR Number;
} SERVICE_DESCRIPTOR_ENTRY,
*PSERVICE_DESCRIPTOR_ENTRY
```

Листинг 1 Описание структуры
`KeServiceDescriptorTable`

```
nt!KeInitThread+0x65
82d3e103 c786bc000000007bb882 mov dword ptr [esi+0BCh],
offset nt!KeServiceDescriptorTable (82b87b00)
```

Листинг 2 Заполнение поля ServiceTable в функции инициализации потока ОС

```
nt!PsConvertToGuiThread+0x4e
82c96165 c786bc000000407bb882 mov dword ptr [esi+0BCh],
offset nt!KeServiceDescriptorTable (82b87b40)
```

Листинг 3 Модификация поля ServiceTable потока в функции PsConvertToGuiThread

В случае если поток использует графическую подсистему, то при первом вызове системного вызова подсистемы Win32 происходит вызов функции PsConvertToGuiThread, которая заменяет значение поля ServiceTable на KeServiceDescriptorTableShadow (см. листинг 3).

Реализуем модельный РТ, который модифицирует в таблице диспетчеризации системных служб указатель на функцию ZwQuerySystemInformation с целью скрытия всех процессов в ОС.

В качестве ЗПО выберем TrendMicro Rootkit Buster v5.0.0 build 1180, последней доступной на момент написания данной работы версии.

В случае непосредственной модификации соответствующего указателя на ZwQuerySystemInformation в KeServiceDescriptorTable.Base (см. листинг 4) ЗПО сообщает о 22 угрозах (рис. 1).

```
dps nt!KeServiceDescriptorTable
82bb1b00 82ac643c nt!KiServiceTable
82bb1b04 00000000
82bb1b08 00000191
82bb1b0c 82ac6a84 nt!KiArgumentTable
dps 82ac643c L 10a
82ac643c 82cc1fcf nt!NtAcceptConnectPort
82ac6440 82b09855 nt!NtAccessChec
...
82ac6848 82d4cc53 nt!NtQuerySystemEnvironmentValue
82ac684c 82d4d247 nt!NtQuerySystemEnvironmentValueEx
82ac6850 9dd0c2b0 drv!new_ZwQuerySystemInformation
82ac6854 82cb2174 nt!NtQuerySystemInformationEx
82ac6858 82cbfe9e nt!NtQuerySystemTime
82ac685c 82d5354e nt!NtQueryTimer
```

Листинг 4 Перечень функций для обработки системных вызовов расположенных в KeServiceDescriptorTable.Base

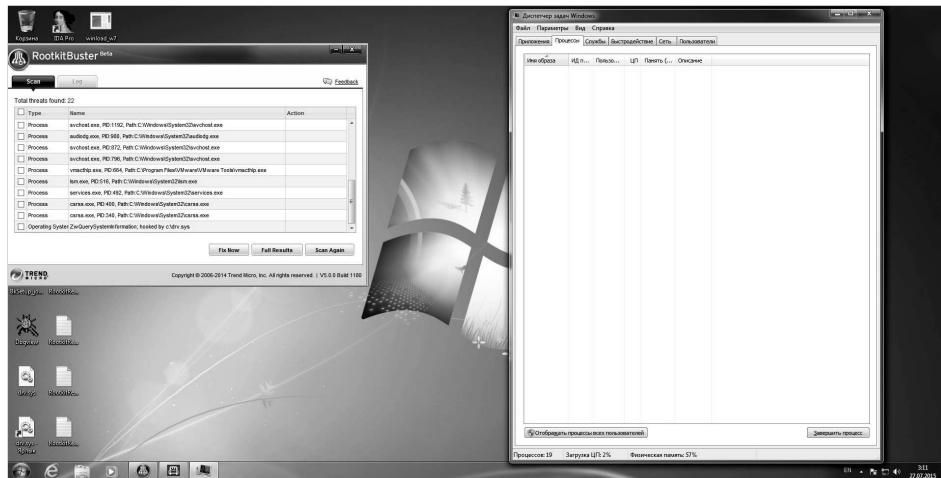


Рис. 1 Реакция ЗПО на сокрытие всех процессов в системе

Модифицируем технику сокрытия. С учетом изложенного выше подменим указатель значения *ServiceTable* структуры *ETHREAD.Tcb* каждого потока, за исключением потоков ЗПО. Для этого зарегистрируем нотификатор на создание потока (листинг 5).

Таким образом, при создании каждого потока получаем адрес *ETHREAD* и заменяем поле *ServiceTable* (листинг 6).

Для Win32-потоков необходимо найти и подменить *PsConvertToGuiThread* (см. листинг 7).

В данной функции необходимо выставлять значение *ServiceTable* потока на *KeServiceDescriptorTableShadow* (рис. 2).

```
NTSTATUS
PsSetCreateThreadNotifyRoutine(
    IN PCREATE_THREAD_NOTIFY_ROUTINE NotifyRoutine
);
```

Листинг 5 Прототип нотификатора, предоставляемого ОС для события создания и удаления потока

```
*(PVOID*)((PUCHAR)Ethread + ServieTableOffset) =
NewKeServiceDescriptorTable;
```

Листинг 6 Пример кода для модификации поля *ServiceTable* структуры *KTHREAD* потока

```

nt!KiBBTUnexpectedRange:
82a85572 83f910      cmp      ecx,10h
82a85575 753d        jne
nt!KiBBTUnexpectedRange+0x42 (82a855b4)
82a85577 52          push     edx
82a85578 53          push     ebx
82a85579 e80262da1c  call
drv!NewPsConvertToGuiThread (9f82b780)
82a8557e 0bc0        or       eax,eax
82a85580 58          pop      eax
82a85581 5a          pop      edx

```

Листинг 7 Модификация PsConvertToGuiThread в функции KiBBTUnexpectedRange

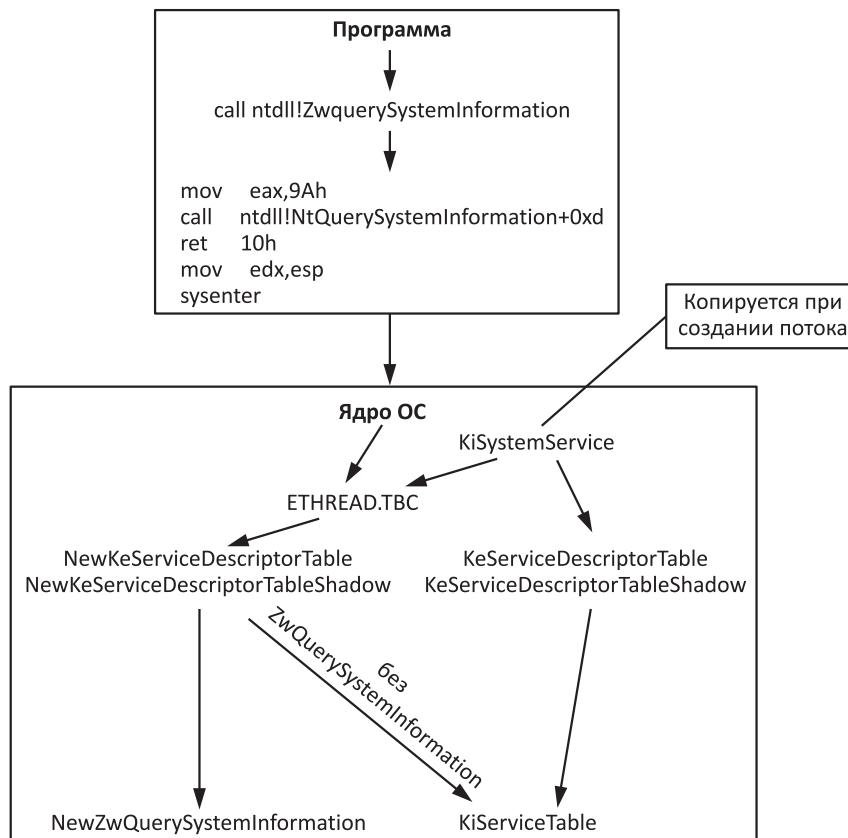


Рис. 2 Модифицированная техника скрытия

```

!process 0 2 taskmgr.exe
PROCESS 86668730 SessionId: 1 Cid: 0fb8 Peb:
7ffd7000 ParentCid: 01e0
DirBase: 3f021440 ObjectTable: 949e1750
HandleCount: 112.
Image: taskmgr.exe x

    THREAD 86fa1d48 Cid 0fb8.0fdc Teb: 7ffdf000
    Win32Thread: fe5a6550 WAIT: (WrUserRequest) UserMode Non-Alertable
        85760030 SynchronizationEvent
    THREAD 86d4bd48 Cid 0fb8.0fd8 Teb: 7ffd9000
    Win32Thread: 00000000 WAIT: (WrQueue) UserMode Alertable
        86792200 QueueObject

dps 86fa1d48+0xbc
86fa1e04 86dc65a0

dps 86dc65a0
86dc65a0 867419b8
86dc65a4 00000000
86dc65a8 00000191
86dc65ac 82acba84 nt!KiArgumentTable
86dc65b0 92e6c000 win32k!W32pServiceTable
86dc65b4 00000000
86dc65b8 00000339
86dc65bc 92e6d02c win32k!W32pArgumentTable
dps 867419b8 L 10a
867419b8 82cc1fcf nt!NtAcceptConnectPort
...
86741dcc 9f82a2b0 drv!new_ZwQuerySystemInformation
...
86741ddc 82c35874 nt!NtQueryTimerResolution

```

Листинг 8 Модификация поля `ServiceTable` структуры `KTHREAD` потоков процесса `taskmgr.exe` с целью скрытия процессов

На примере диспетчера задач посмотрим, как изменилось значение `ServiceTable` в его потоках (см. листинг 8).

Таким образом, модификация успешно произошла.

При применении данной техники реакция ЗПО отсутствует (рис. 3).

Построим ЗПО, детектирующее РТ кольца 0. Рассмотрим механизм системных вызовов и организацию стека драйверов Windows NT для определения перечня параметров [10], которые необходимо проверять ЗПО для обнаружения РТ.

Как было рассмотрено выше, переход на уровень ядра происходит путем вызова либо специальной инструкции процессора `sysenter`, либо специально зарегистрированного прерывания `int 2Eh`. В современных ОС на базе Windows

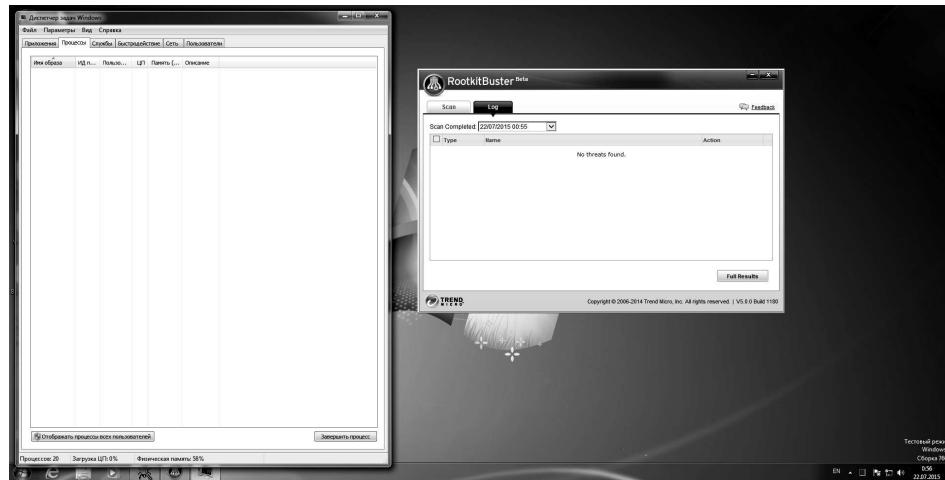


Рис. 3 Отсутствие реакции ЗПО на сокрытие всех процессов в ОС

```
ntdll!NtQuerySystemInformation:  
77901e20 b89a000000 mov     eax,9Ah  
77901e25 e803000000 call    ntdll!NtQuerySystemInformation+0xd (77901e2d)  
77901e2a c21000 ret     10h  
77901e2d 8bd4     mov     edx,esp  
77901e2f 0f34     sysenter
```

Листинг 9 Вызов в sysenter функции NtQuerySystemInformation из библиотеки ntdll

NT использует только `sysenter`, обработчик прерывания `int 2Eh` сохранен для обеспечения обратной совместимости (см. листинг 9).

Инструкция `sysenter` использует три `msr`-регистра процессора [11]:

- (1) `IA32_SYSENTER_CS` — номер `174h`, устанавливает `cs`;
- (2) `IA32_SYSENTER_ESP` — номер `175h`, устанавливает `esp`;
- (3) `IA32_SYSENTER_EIP` — номер `176h`, устанавливает `eip`.

Таким образом, необходимо контролировать корректность обработчика прерывания по номеру `0x2Eh` в таблице IDT (см. листинг 10), а также значение `msr`-регистра с номером `176h`, поскольку при системном вызове регистр `eip` устанавливает значение данного регистра (см. листинг 11).

Получаем, что `nt!KiFastCallEntry` и `nt!KiSystemService` являются точками входа диспетчера системных вызовов. Диспетчер системных вызовов находит необходимую для вызова функцию в специальных таблицах по соответствующим

```
!idt 2e
Dumping IDT: 80427400
dd0c68c00000002e: 8133c965
nt!KiSystemService
```

Листинг 10 Содержание таблицы IDT по номеру 0x2Eh

```
rdmsr 176
msr[176] = 00000000'8133ca50
u 8133ca50
nt!KiFastCallEntry
```

Листинг 11 Содержание msr-регистра с номером 176

номерам. Данный механизм подробно описан выше. Отсюда понятно, что необходимо контролировать значение указателей на функции `nt!KiServiceTable` для функций ядра и `win32k!W32pServiceTable` для графической подсистемы.

Проанализировав точку входа в диспетчер системных вызовов, можно заметить, что значение дескриптора системного сервиса берется из структуры `ETHREAD.Tcb` текущего потока, которое, в свою очередь, устанавливается при создании потока в функции `KelnitThread` (см. листинг 12).

```
u nt!KiFastCallEntry + 0xA5 L A
nt!KiFastCallEntry+0xa5:
8133caf5 fb          sti
8133caf6 8bf8        mov   edi,eax
8133caf8 c1ef08      shr   edi,8
8133caf9 83e710      and   edi,10h
8133cafe 8bcf        mov   ecx,edi
8133cb00 037e3c      add   edi,dword ptr [esi+3Ch]
8133cb03 8bd8        mov   ebx,eax
8133cb05 25ff0f0000  and   eax,0FFFh
8133cb0a 3b4708      cmp   eax,dword ptr [edi+8]
8133cb0d 0f83f1f9ffff jae   nt!KiEndUnexpectedRange (8133c504)
nt!KelnitThread+0x5e:
818f3494 c7473cc0b28e81 mov   dword ptr
[edi+3Ch],offset nt!KeServiceDescriptorTable (818eb2c0)
```

Листинг 12 Использование поля `ServiceTable` структуры `KTHREAD` потока при системном вызове

Отсюда получаем, что необходимо контролировать также значение указателя `ServiceTable` в структуре `ETHREAD.Tcb` всех потоков в системе.

Были рассмотрены возможные точки модификации потока исполнения в реализации системного вызова. Рассмотрим аспекты, связанные с начальной инициализацией данных ядра. Возможные следующие механизмы модификации:

- сплайсинг [10] кода диспетчера системных вызовов и функций-обработчиков;
- модификация указателей на `KeServiceDescriptorTable` и `KeServiceDescriptorTableShadow` в ядре.

Отсюда имеем, что необходимо контролировать целостность ядра путем сравнения с внешним эталоном и проверять корректность указателей в ядре на `KeServiceDescriptorTable` и `KeServiceDescriptorTableShadow`.

Итак, был рассмотрен поток исполнения системного вызова либо до ядерной структуры, либо до драйвера устройства. Существуют техники непосредственной модификации ядерных структур (технологии DROM — data read only memory [12]), однако полное сокрытие в данном случае недостижимо ввиду необходимости работы с ними непосредственно ОС. Рассмотрим более подробно драйверную подсистему Windows NT.

Драйверная подсистема Windows NT имеет стековую архитектуру. Драйверы для устройства могут организовываться в цепочку и взаимодействовать друг с другом посредством специального протокола IRP под управлением подсистемы ввода/вывода Windows [10]. В каждом драйвере представлен ряд функций-обработчиков IRP-пакетов. Таким образом, получается, что необходимо контролировать:

- легальность устройств-фильтров, присоединенных к целевому устройству;
- корректность указателей на IRP-обработчики в дескрипторе драйверов;
- модификации IRP-обработчиков драйверов.

Суммируя изложенное выше, при отсутствии недекларированных возможностей получаем, что для детектирования РТ ЗПО необходимо контролировать следующие параметры:

- значения указателей на функции в `KiServiceTable`;
- значения `msr`-registров, относящихся к инструкции `SYSENTER`;
- корректность значений `IDT`;
- значение указателя `ServiceTable` в структуре `ETHREAD.Tcb`;
- корректность указателей на `KeServiceDescriptorTable` и `KeServiceDescriptorTableShadow` в `KelnitThread` и `PsConvertToGuiThread`;
- модификации кода диспетчера системных вызовов;
- модификации функций-обработчиков системного вызова;
- легальность устройств-фильтров, присоединенных к целевому устройству;
- корректность указателей на IRP-обработчики в дескрипторе драйверов;
- модификации IRP-обработчиков драйверов.

4 Модель случайного ограничения возможностей вредоносного программного обеспечения

Несмотря на то что теоретически контроль основных параметров ядра ОС с помощью ЗПО возможен, на практике могут возникать большие вычислительные трудности. В связи с этим возможность полного контроля за один квант

машинного времени практически не достижима. Отметим, что, несмотря на то что ВПО, обладающее достаточными привилегиями, имеет возможность воздействовать на механизм распределения процессорного времени, с практической точки зрения это нецелесообразно, ввиду того что оказывает значительное влияние на производительность ОС.

Рассмотрим возможность последовательного контроля основных параметров, позволяющих идентифицировать наличие ВПО в ядре ОС. Предположим, что таких параметров N , время дискретно и на проверку одного параметра затрачивается одно и то же время τ . Тогда на последовательный просмотр всех параметров требуется $N\tau$ времени. Пусть ЗПО способно проанализировать корректность одного параметра за один квант машинного времени. Если фиксировать порядок проверки, то РТ может со временем определить этот порядок и использовать эту информацию для «обмана» ЗПО. Единственный способ не допустить возможности такой атаки РТ на ЗПО — это случайная генерация номеров контролируемого процесса. Однако построение вероятностной модели, позволяющей обойти все контролируемые параметры по одному разу в случайному порядке, достаточно сложно.

Самой простой схемой является независимый и равновероятный выбор контролируемого параметра на каждом шагу контроля. Такой подход увеличит время обхода всех контролируемых параметров, но значительно упростит реализацию процесса выбора контролируемого параметра. В качестве генератора случайных чисел можно использовать какой-либо случайный процесс в компьютере или генератор псевдослучайных чисел, построенный на однонаправленной функции.

В этой модели можно использовать результаты классической задачи о размещениях [13]. Согласно [13], время v_N реализации контроля всех необходимых параметров имеет следующие математическое ожидание и дисперсию:

$$\mathbb{E}v_N = N \sum_{i=1}^N \frac{1}{i}; \quad \text{D}v_N = N^2 \sum_{i=1}^N \frac{1}{i^2} - \mathbb{E}v_N. \quad (1)$$

При $N \rightarrow \infty$ формулы (1) принимают вид:

$$\mathbb{E}v_N = N \ln N + O(N); \quad \text{D}v_N = \frac{\pi^2}{6} N^2 - N \ln N + O(N). \quad (2)$$

Из приведенных результатов следует, что использование независимого равновероятного выбора очередного параметра контроля приводит к незначительному увеличению времени обхода всех контролируемых параметров.

Данный подход можно обобщить, если за один квант выделяемого машинного времени система контроля может просмотреть k контролируемых параметров. При независимом и равновероятном выборе k параметров контроля время контроля всех параметров увеличивается (см. (2)), но возможности ВПО по обману ЗПО значительно сокращаются.

5 Заключение

В данной работе были проанализированы технологии взаимодействия исполняемого вредоносного кода и ЗПО. Для ОС двухуровневой архитектуры, которые наиболее распространены на текущий момент, обоснован результат, состоящий в том, что если РТ целевым образом не воздействует на ЗПО, то ЗПО не всегда может его обнаружить. Несмотря на теоретический характер этого результата, практически контролль не достигается в реализациях современного ЗПО. Это демонстрируется в данной работе путем конструирования модельного РТ для одной общедоступной реализации ЗПО. Отсюда следует, что существует потребность в разработке практических правил построения ЗПО, обеспечивающих практически необходимый контроль над ВПО.

Литература

1. *Hoglund G., Butler J.* Rootkits: Subverting the windows kernel. — Addison-Wesley Professional, 2007. 352 p.
2. *Rutkowska J.* Introducing stealth malware taxonomy // Help Net Security, 2006. <http://www.net-security.org/dl/articles/malware-taxonomy.pdf>.
3. *Lau H.* Are MBR infections back in fashion? // Symantec Corporation, 2011. <http://www.symantec.com/connect/blogs/are-mbr-infections-back-fashion>.
4. *Matrosov A., Rodionov E.* Modern Bootkit Trends: Bypassing kernel-mode signing policy // ESET, 2011. <http://www.eset.com/us/resources/white-papers/Rodionov-Matrosov.pdf>.
5. *Голованов С., Русаков В.* Атаки до загрузки системы // SECURELIST, 2014. <https://securelist.ru/blog/issledovaniya/20151/ataki-do-zagruzki-sistemy>.
6. *Collins R. R.* Intel's system management mode. 1997. <http://www.rcollins.org/ddj/Jan97/Jan97.html>.
7. *Embleton S., Sparks S.* SMM rootkits. 2008. http://www.hakim.ws/BHUSA08/speakers/Embleton_Sparks_SMM_Rootkits/BH_US_08_Embleton_Sparks_SMM_Rootkits_WhitePaper.pdf.
8. Intel(R) 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual. Vol. 3A: System Programming Guide. Pt. 1. Ch. 9.11: Microcode update facilities. — Intel(R), 2015. P. 432–463.
9. *Menn J.* Russian researchers expose breakthrough U.S. spying program. 2015. <http://www.reuters.com/article/2015/02/16/us-usa-cyberspying-idUSKBN0LK1QV20150216>.
10. *Russinovich M., Solomon D. A., Ionescu A.* Windows internals. — 6th ed. — Microsoft Press Publ., 2012. 752 p.
11. Intel(R) 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual. Vol. 3C: System Programming Guide. Pt. 3. Ch. 34.1. — Intel(R), 2015. P. 209–210.

12. Blunden B. The rootkit arsenal: Escape and evasion in the dark corners of the system. — Jones & Bartlett Learning Publ., 2009. 908 p.
13. Колчин В. Ф., Севастьянов Б. А., Чистяков В. П. Случайные размещения. — М.: Наука, 1976. 224 с.

Поступила в редакцию 19.08.15

PROBLEMS OF INTERACTION OF THE MALICIOUS CODE AND PROTECTION PROGRAMS IN ARCHITECTURE OF MODERN OPERATING SYSTEMS

R. R. Giliakov¹ and A. A. Grusho²

¹M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

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

Abstract: The paper considers the interaction between malware and security software environments of modern operating systems. In particular, a number of aspects which are related to the software module that provides an opportunity for sustainable and undetectable presence of the offender in computer systems is considered. A number of statements is made about relationships between the technologies used in security software and ensuring “invisibility” of the executable malicious code. The possibility of undetectable rootkit presence in modern security software is shown on practice. In addition, the mechanism of system calls and drivers subsystem of Windows NT is analyzed. Furthermore, necessary practical requirements for implementation of security software are developed. The model of random restriction of malicious software for security software is constructed.

Keywords: information security; security software; malicious software; rootkit; antivirus; technologies of hiding execution code

DOI: 10.14357/08696527150306

Acknowledgments

The paper was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-07-02053).

References

1. Hoglund, G., and J. Butler. 2007. *Rootkits: Subverting the windows kernel*. Addison-Wesley Professional Publ. 352 p.

2. Rutkowska, J. 2006. Introducing stealth malware taxonomy. Help net security. Available at: <http://www.net-security.org/dl/articles/malware-taxonomy.pdf> (accessed August 17, 2015).
3. Lau, H. 2011. Are MBR infections back in fashion? *Symantec Corporation*. Available at: <http://www.symantec.com/connect/blogs/are-mbr-infections-back-fashion> (accessed August 17, 2015).
4. Matrosov, A., and E. Rodionov. 2011. Modern Bootkit Trends: Bypassing kernel-mode signing policy. *ESET*. Available at: <http://www.eset.com/us/resources/white-papers/Rodionov-Matrosov.pdf> (accessed August 17, 2015).
5. Golovanov, S., and V. Rusakov. 2014. Ataki do zagruzki sistemy [Attacks before loading of system]. *SECURELIST*. Available at: <https://securelist.ru/blog/issledovaniya/20151/ataki-do-zagruzki-sistemy/> (accessed August 17, 2015).
6. Collins, R. R. 1997. Intel's system management mode. Available at: <http://www.rcollins.org/ddj/Jan97/Jan97.html> (accessed August 17, 2015).
7. Embleton, S., and S. Sparks. 2008. SMM rootkits. Available at: http://www.hakim.ws/BHUSA08/speakers/Embleton_Sparks_SMM_Rootkits/BH_US_08_Embleton_Sparks_SMM_Rootkits_WhitePaper.pdf (accessed August 17, 2015).
8. Intel(R). 2015. Intel(R) 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual. Vol. 3A: System Programming Guide. Pt. 1. Ch. 9.11: Microcode update facilities. 432–463.
9. Menn, J. 2015. Russian researchers expose breakthrough U.S. spying program. Available at: <http://www.reuters.com/article/2015/02/16/us-usa-cyberspying-idUSKBN0LK1QV20150216> (accessed August 17, 2015).
10. Russinovich, M., D. A. Solomon, and A. Ionescu. 2012. *Windows internals*. 6th ed. Microsoft Press Publ. 752 p.
11. Intel(R). 2015. Intel(R) 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual. Vol. 3C: System Programming Guide. Pt. 3. Ch. 34.1. 209–210.
12. Blunden, B. 2009. *The rootkit arsenal: Escape and evasion in the dark corners of the system*. Jones & Bartlett Learning Publ. 908 p.
13. Kolchin, V. F., B. A. Sevastyanov, and V. P. Chistyakov. 1976. *Sluchaynye razmeshcheniya* [Random placements]. — M.: Nauka. 224 p.

Received August 19, 2015

Contributors

Giliakov Ruslan R. (b. 1989)— junior scientist, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; irusrubin@gmail.com

Grusho Alexander A. (b. 1946)— Doctor of Science in physics and mathematics, professor, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; grusho@yandex.ru

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ*

С. К. Дулин¹, И. Н. Розенберг², В. И. Уманский³

Аннотация: Обсуждаются географические стандарты, разработанные ведущими организациями по стандартизации. Опыт реализации геоинтероперабельности показывает, что проблема геоинтероперабельности — это в большой степени проблема стандартизации. Принятие стандартов для обеспечения интероперабельности — центральный момент управления информационной инфраструктурой. Потенциальные пользователи геоданных заинтересованы в том, чтобы взаимодействующие решения различных приложений улучшали экономическую производительность и качество принятия решений, и выражают потребность в использовании геоинформационных стандартов, которые работают независимо от вычислительной платформы и языка, обеспечивая конкурентоспособность разработок.

Ключевые слова: географические стандарты; геоданные; семантическая геоинтероперабельность; онтологии; Semantic Web

DOI: 10.14357/08696527150307

1 Введение

Современный рынок геоинформационных услуг заинтересован в реализации геоинтероперабельности, что подтверждается недавними совместными исследованиями ведущих организаций по стандартизации — Консорциума геопространственной информации (Open Geospatial Consortium, OGC) и Технического комитета Международной организации по стандартизации 211 (ISO's Technical Committee 211 (Geomatics, Geographic Information)).

Преграды для реализации геоинтероперабельности серьезно ограничивают деятельность в области геоинформации из-за увеличивающейся потребности в интеграции большого количества пространственных компонентов в геоинформационных системах предприятий. Стандартизация протоколов, форматов и особенно интерфейсов может помочь преодолеть эти преграды.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 14-07-00040 и 14-07-00785).

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), s.dulin@ccas.ru

²Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), I.Rozenberg@gismps.ru

³Интехгеотранс, utmanvi@yandex.ru

Прошлые десятилетия были продуктивными с точки зрения развития геоинтегрированности, облегчающей совместное использование геоданных. И все же, несмотря на то что стандарты, разработанные ISO/TC 211 и OGC, обеспечили основу для ее развития, а в международных организациях, таких как Canadian Geospatial Data Infrastructure (CGDI), National Spatial Data Infrastructure (NSDI), Infrastructure for Spatial Information in Europe (INSPIRE), Global Spatial Data Infrastructure (GSDI), появились пространственные инфраструктуры данных, реализация геоинтегрированности все еще находится на начальной стадии реализации.

Open Geospatial Consortium, Inc. — некоммерческая организация, основанная в 1994 г. для поддержки разработок интегрированности систем, которые обрабатывают геоданные (<http://www.OpenGIS.org/info/brochure/brochure0599.pdf>). Деятельность OGC по развитию технологий существенно повлияла на глобальную организацию геоданных и создание стандартов обработки геоданных и продемонстрировала преимущества открытых технологий геоинформации, которые объединяют обработку геоданных с распределенной архитектурой и интернет-вычислениями.

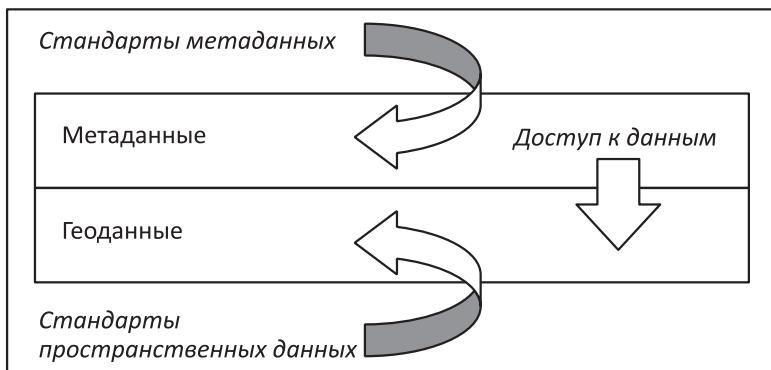
Деятельность OGC фокусируется на выполнении двух программ: программы спецификации и программы интегрированности, с явным приоритетом в отношении последней.

Программа спецификации — программа установления согласия среди членов консорциума, обладающих правом голоса. Во многом эта программа подобна процессу создания международных стандартов. Основные различия здесь связаны с организацией самого процесса согласования и подхода к решению по привлечению к разработке основной группы сотрудников OGC, разработчиков и независимых консультантов.

Программа интегрированности развивается относительно недавно. В ней установлена необходимость гарантировать заинтересованному лицу, что его требования будут приняты во внимание на ранней стадии и что они будут влиять на конечные результаты, а согласование семантики концепции определено как основная веха всей работы: после согласования семантики концепции ее новая спецификация проходит через программу спецификации. В контексте этой формулировки может быть замечено, что взаимосвязанные требования интегрированности множества сотрудничающих заинтересованных лиц должны быть удовлетворены в рамках конкретного проекта, в результате чего заинтересованные лица становятся интегрированными.

2 Геоинформационные стандарты для семантической геоинтегрированности

Стандарты — это установленное согласие, представленное как модель или образец (<http://www.m-w.com/>). В контексте геоинформационных систем они подразумевают соглашения о представлении информации в таком виде, чтобы

**Рис. 1** Интероперабельность и стандарты

компьютеры могли «понять» общий язык, обеспечивающий понимание и сотрудничество. Стандартизация касается, главным образом, технического и семантического уровней геоинтероперабельности [1]. Как видно из рис. 1 (<http://www.ec-gis.org/etemii/>), помимо стандартов, имеющих дело с манипуляцией геоданными (пространственные *стандарты*, обеспечивающие интерфейсы для стандартных методов), существуют также и стандарты для доступа к географическим данным из метаданных, и стандарты метаданных, которые используются для каталогов, описывающих содержание информационных ресурсов пространственных данных. Эти ресурсы необходимы, чтобы можно было найти геоданные в сети, и поэтому они должны быть в стандартных форматах (*стандартах метаданных*).

Стандарты также используются, чтобы корреспондировать с другими ресурсами типа открытых веб-сервисов (www.opengis.org/ows) для совместного использования или формирования цепочки сервисов.

Стандартизация в области цифровой географической информации необходима для обеспечения гарантии того, что пространственная информация сможет свободно распространяться в глобальной среде. Разработка международных стандартов продвигается чрезвычайно быстрыми темпами. Здесь, как уже отмечалось выше, определились два главных разработчика: OGC и ISO/TC211 — с широко известными результатами своего сотрудничества.

Моделирование семантики глубоко внедрено в структуру геоинтероперабельности и, таким образом, обеспечивает исчерпывающее описание семантической геоинтероперабельности в целом, которая лежит в основе развития семантической пространственной инфраструктуры данных и Semantic Web геопространственной информации.

Геоинтероперабельность представляет собой основу для развития и реализации пространственных инфраструктур данных (Spatial Data Infrastructures, SDIs) [2]. Цель SDIs состоит в том, чтобы координировать полезный обмен

и совместное использование географической информации с использованием соответствующих сервисов. SDIs — это средства разработки функциональной совместимости для географической информации. SDIs составлены из следующих пяти элементов: методики, технологии, стандарты, человеческие ресурсы и релевантные действия, требуемые для сбора, обработки, управления, доступа, поставки и использования географической информации. SDIs были разработаны на основе референсной модели для Open distributed processing (RM-ODP) [3]. RM-ODP структурно состоит из следующих пяти разделов: раздел содержания, информационный раздел, вычислительный раздел, технический раздел и раздел технологии. В контексте SDIs раздел содержания описывает цели и возможности, методики, обязанности и бизнес-процессы SDIs. Информационный раздел, по существу, посвящен информации, доступной через SDIs и необходимой для семантической геоинтероперабельности. Вычислительный раздел касается функциональной декомпозиции SDIs в сервисы с интерфейсами и операциями. Этот раздел представляет большой интерес для определения семантических компонентов и сервисов. Технический раздел главным образом отвечает за взаимодействие между данными, сервисами и системными взаимосвязями. Наконец, раздел технологии относится к определенно выбранной технологии для реализации SDIs.

ISO/TC211 — один из множества технических комитетов, зарегистрированных в ISO (Международной организации по стандартизации). Он был сформирован для развития стандартизации в области цифровой геоинформации. Основная цель ISO/TC211 — установить структурированный набор стандартов для информации, касающейся объектов или явлений, которые прямо или косвенно связаны с местоположением относительно Земли. Эти стандарты могут специфицировать геоинформацию, методы, инструментальные средства и сервисы для организации геоданных (включая определение и описание), приобретения, обработки, анализа, доступа, представления и передачи таких геоданных в цифровой/электронной форме между различными пользователями, системами и местоположениями. ISO/TC211 связан с разработкой набора стандартов, допускающих геоинтероперабельность. Эти стандарты поддерживают понимание и использование геоинформации, улучшают ее доступность, интеграцию, совместное использование и разработку SDIs. Все это обеспечивает фундаментальную структуру и семантику для описания и представления геоинформации. В их основе лежит, как уже отмечалось, референсная модель, основанная на RM-ODP, в которой большое внимание уделено семантике. В ней было определено множество основополагающих понятий. Например, можно указать примеры представления геометрии (рис. 2) и топологии [4, 5], временных понятий [6], геометрии покрытия [7], трекинга и навигации [8], мультимодальной маршрутизации и навигации [9] и перемещения характеристик [10]. Понятия в этих стандартах также поддерживаются определениями, обеспечивающими необходимую информацию, например: пространственная координатная ссылка [11], качество данных [12–14] и метаданные [15–17].

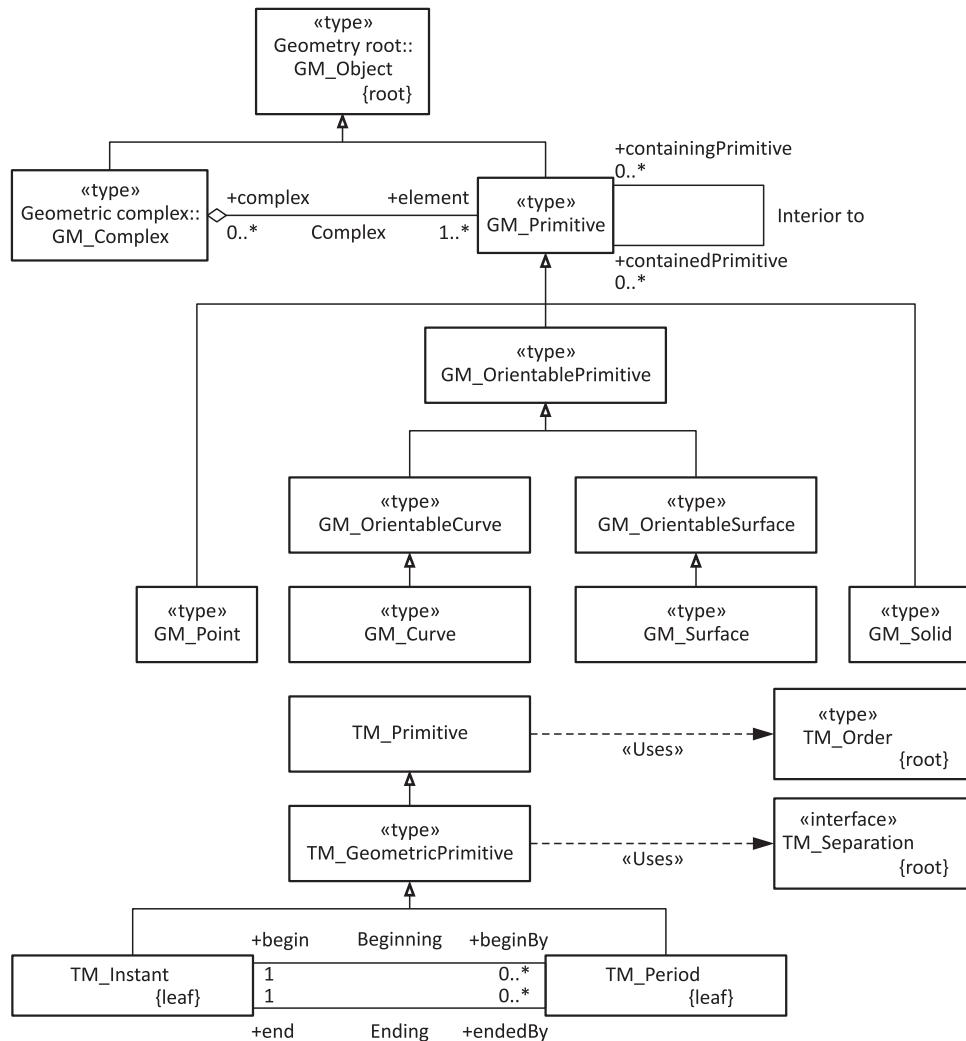


Рис. 2 Геометрические понятия ISO 19107:2003

Два фундаментальных стандарта ISO 19109 и ISO 19110 включают правила для создания прикладной схемы [18] и методологию каталогизации [19]. Это основополагающие стандарты для описания семантики геоинформации.

Стандарт ISO 19109, первоначально введенный в референсной модели, описывает General Feature Model (GFM) [20]. GFM — метамодель, которая определяет метапонятия, используемые для классификации и описания географических примитивов (рис. 3) [20]. Самый важный элемент метамодели — GF FeatureType,

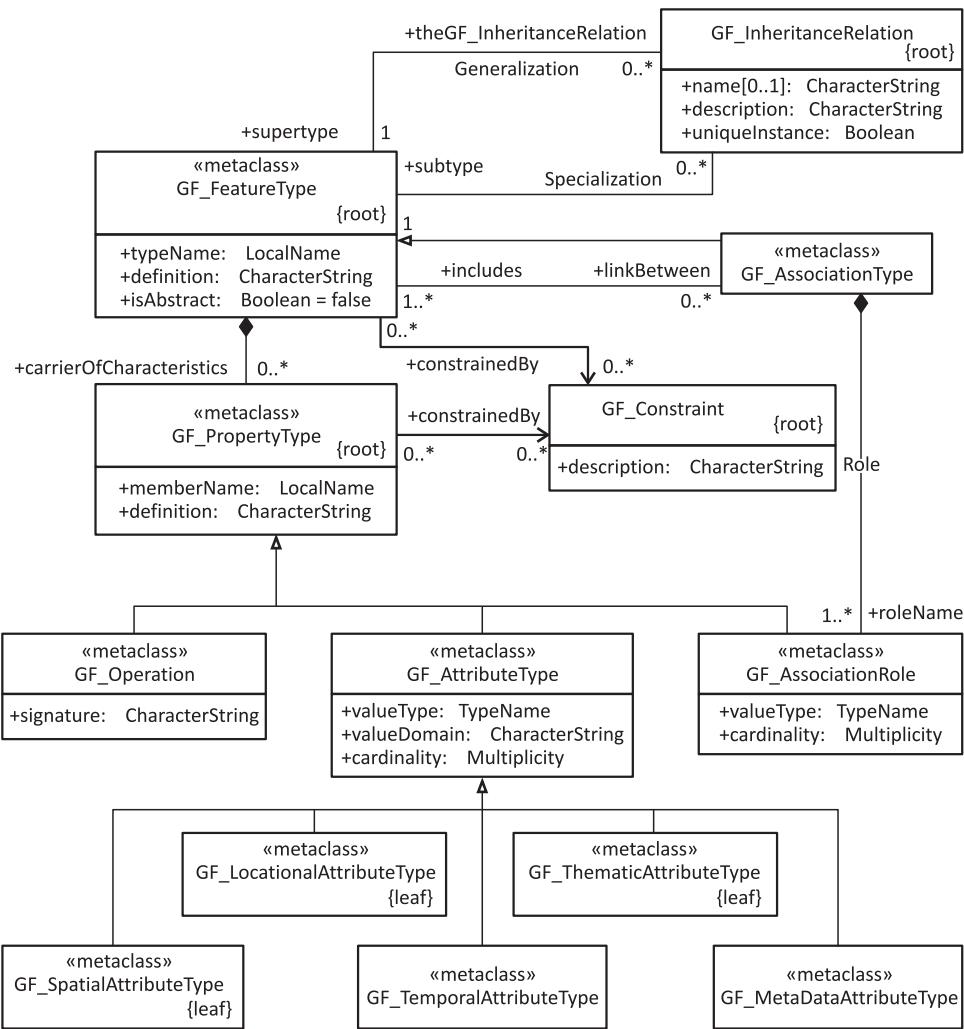


Рис. 3 Общая модель географических примитивов

который является метаклассом всех типов географических примитивов (дорога, здание, парк, река и т. д.).

GF FeatureType может быть составлен из характеристик, которые описаны согласно метаклассу GF PropertyType. Характеристики могут быть или операциями (метакласс GF Operation metaclass), или атрибутами (GF AttributeType metaclass), или ролями в ассоциациях (GF AssociationRole metaclass). Атрибут может быть пространственным (GF SpatialAttributeType metaclass),

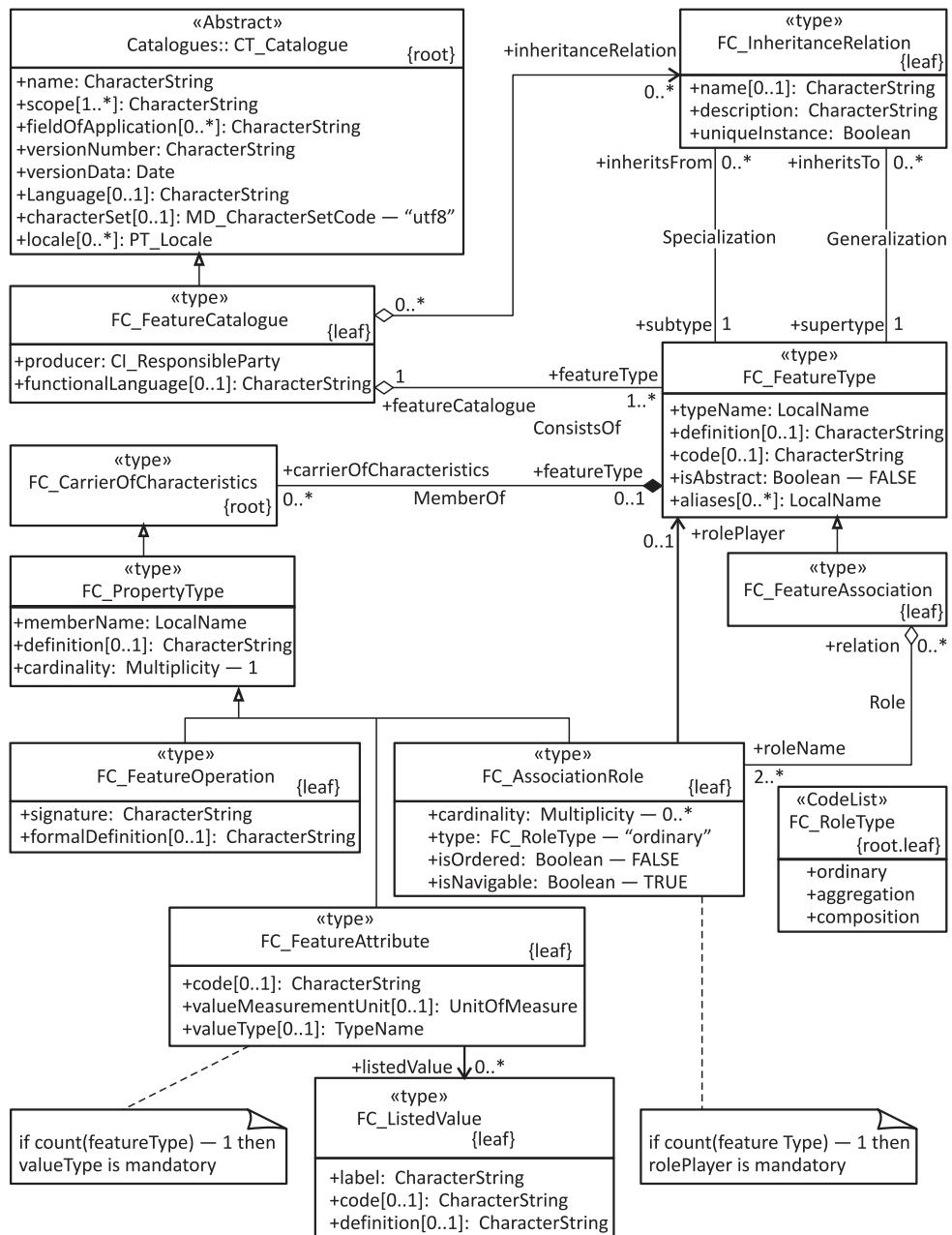


Рис. 4 Каталогизация географических примитивов

навигационным (GF LocationAttributeType metaclass), временным (GF TemporalAttributeType metaclass), тематическим (GF ThematicAttributeType metaclass) или вспомогательным (GF MetadataAttributeType metaclass). Примеры GF FeatureType могут быть соединены с ассоциациями, представленными согласно описанию класса GF Association class. Отношения наследования между типами географических объектов возможны с классом GF Inheritance class. Ограничения для типов и характеристик географических деталей могут быть определены посредством класса GF Constraint class.

ISO 19110 предлагает методологию реализации средств графического мониторинга для семантического описания типов географических примитивов, характеристик, ассоциаций, ограничений, т. е. методологию каталогизации географических примитивов (рис. 4). Соответственно, каталог географических примитивов [19] содержит определения и описания типов географических примитивов, атрибутов географических примитивов и ассоциаций географических примитивов, имеющихся в одном или более наборах географических данных, вместе с любыми операциями над географическими примитивами, которые к ним могут применяться.

Все понятия, определенные в ISO географических информационных стандартов, составляют впечатительную онтологию для географической информационной области. Понятия формализованы графически с помощью универсального языка моделирования (Unified Modeling Language, UML). Хотя UML имеет достаточную выразительность для определения понятий с ISO/TC 211, получающиеся диаграммы не предназначены для того, чтобы быть машиночитаемыми и обрабатываемыми, и не могут использоваться непосредственно, чтобы поддержать логический вывод на основе онтологии.

3 Геостандарты веб-модели

Веб-модель — ключевое понятие для увеличения доступа к геомоделям и облегчения межмодельного взаимодействия, обеспечивающее взаимодействие моделей, баз данных и веб-сайтов. Попытки объединения независимых моделей для формирования слабосвязанных модельных систем осуществлялись в различных формах, но технологические проблемы и другие ограничения затормозили его реализацию. Только недавно эта идея была формализована как веб-модель.

Стандарт модельного доступа на основе веб-сервисов, названный «Модель как сервис» (MaaS), обсуждался разработчиками уже несколько лет. В результате были спроектированы и проверены унифицированные модельные интерфейсы для представления моделей веб-сервисами. Веб-модель MaaS использует веб-сервисы, которые способствуют интероперабельности большой системы независимых взаимодействующих моделей.

Концепция стандарта веб-модели одобрена в рамках группы по наблюдениям за Землей (Group on Earth Observations, GEO) и системы глобального наблюдения за Землей (Global Earth Observation System of Systems, GEOSS).

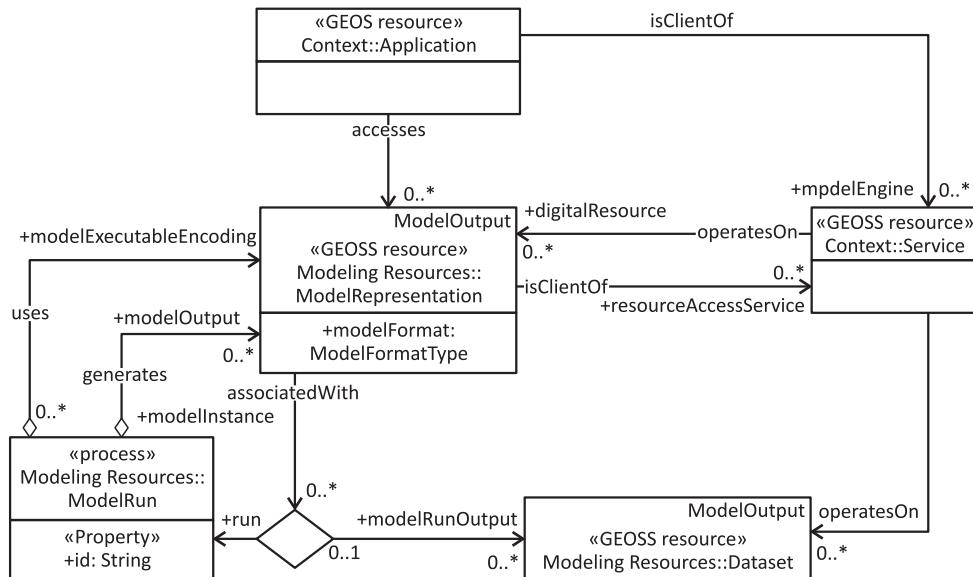


Рис. 5 Концептуальная структура веб-модели

Упрощенная версия концептуальной структуры веб-модели изображена на рис. 5 (схемы на рис. 5–7 [21] представлены в нотации UML). Любое приложение (Application) может обратиться к геомодели — т. е. представлению модели (Model), formalизованной в виде сущности ModelRepresentation (рис. 6). Приложение может получить доступ к объекту ModelRepresentation через веб-сервис, т. е. сущность ModelRepresentation — это цифровой ресурс, доступный как сервис (Service), и модель здесь выступает как сервис.

Сущность ModelRepresentation связана с одним или более выполнениями сервисов (т. е. сущностями ModelRun), которые могут генерировать другую сущность ModelRepresentation либо один или более объектов набора данных (Dataset objects).

Для веб-модели сущности Application, Service и Dataset objects идентифицируются элементами, зарегистрированными в GEOSS.

Сущность ModelRun представляет выполнение сервисов данной модели; это основной объект информационной модели, описывающей георесурсы модели.

Упрощенная версия стандарта модели данных для геомодельных ресурсов показана на рис. 6.

Абстрактная модельная сущность представляет собой концептуальную и математическую структуру геомодели. Модель может быть охарактеризована (сконфигурирована) набором сущностей ModelParameter. Модель представлена одним или более объектами ModelRepresentation и приписана к одному или более объектам ModelRun.

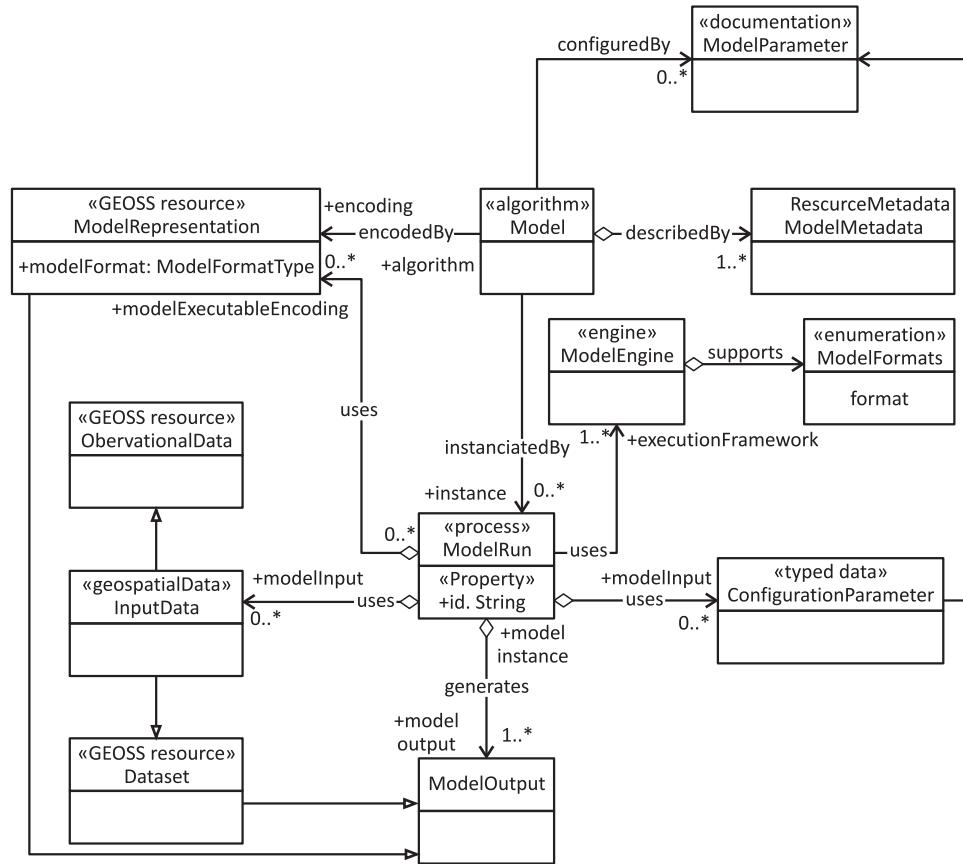


Рис. 6 Модель данных георесурсов

Сущность ModelRepresentation — представление конкретной модели. Примеры модельных представлений — обычные программы, которые определяют ряд выполняемых инструкций или процедур. Каждая компьютерная программа может быть рассмотрена как представление модельной сущности. В отличие от процедурных представлений, декларативные представления определяют элементы модели, переменные и функциональные отношения между ними. Структура фактически не налагает никаких ограничений на архитектуру моделирования, представленную сущностью ModelRepresentation.

ModelRun запускает выполнимое кодирование модели, которая представлена объектом ModelRepresentation. В качестве входной информации ModelRun использует: (а) один или более объектов ConfigurationParameter; (б) один или более объектов InputData. Сущность ConfigurationParameter зависит от сущно-

сти ModelParameter. При этом ModelRun выполняется объектом ModelEngine. Фактически объект ModelEngine представляет собой инструмент или структуру, которая в состоянии выполнить запуски сервисов модели.

Сущность ModelRun генерирует один или более объектов ModelOutput. Сущность ModelOutput может быть или объектом ModelRepresentation, или многими объектами Dataset objects.

В соответствии с подходом к реализации интероперабельности на основе модельной управляемой архитектуры (Model Driven Architecture) объекты, введенные предложенными схемами, должны быть описаны наборами полей метаданных. Схемы метаданных могут быть различными, поскольку они содержат информацию для достижения нужных средств интероперабельности.

На рис. 7 показаны сущности метаданных, необходимые для описания концепций, которые относятся к таким средствам интероперабельности, как ModelMetadata, RunMetadata, EngineMetadata, DataMetadata, ServiceMetadata и ApplicationMetadata.

Некоторые метаданные, такие как наборы данных описания, сервисы и приложения, уже являются принятыми в нескольких предметных областях. Но метаданные, описывающие модель, ее выполнение и связанную с ней структуру выполнения сервисов, — относительно новые понятия для многих областей.

Для обрабатывающих системных георесурсов непрактично строить монолитную систему данных. Сервисно-ориентированная архитектура (Service Oriented Architecture, SOA) в этой ситуации наиболее целесообразна.

SOA основана на положении о том, что выгодно декомпозировать большую проблему на коллекцию меньших связанных подпроблем. Сервисы при этом действуют как черные ящики, скрывающие свои детали от внешней среды. А взаимодействия могут иметь место в соответствии с соглашениями по технологиям интероперабельности, основанными на открытых стандартах.

SOA затрагивает три важных проблемы интероперабельности: (1) семантическую интероперабельность, особенно актуальную при использовании SOA в сложных инфраструктурах, которые пересекаются или выходят за границы предметной области; (2) гетерогенность и сложность стека веб-сервисов — препятствие, присущее SOA, которая является довольно сложной технологией, осуществляющей подключения компьютер–компьютер; (3) существование дистанции между пользователями и компьютерами, так как SOA испытывает недостаток в интуитивно управляемом человеком сервисном взаимодействии и компоновке.

Обычно веб-сервисы используют схемы XML, чтобы определить структуру обмениваемых документов. Однако эти схемы не фиксируют семантику элементов документа. Та же самая ситуация имеет место для XML-диалекта — языка описания веб-сервисов (Web Service Definition Language) и описания сервисов, где критически не хватает семантически богатого описания. Автоматическое открытие и композиция сервисов не могут быть реализованы до тех пор, пока перечисление сервисных свойств однозначно не определено.

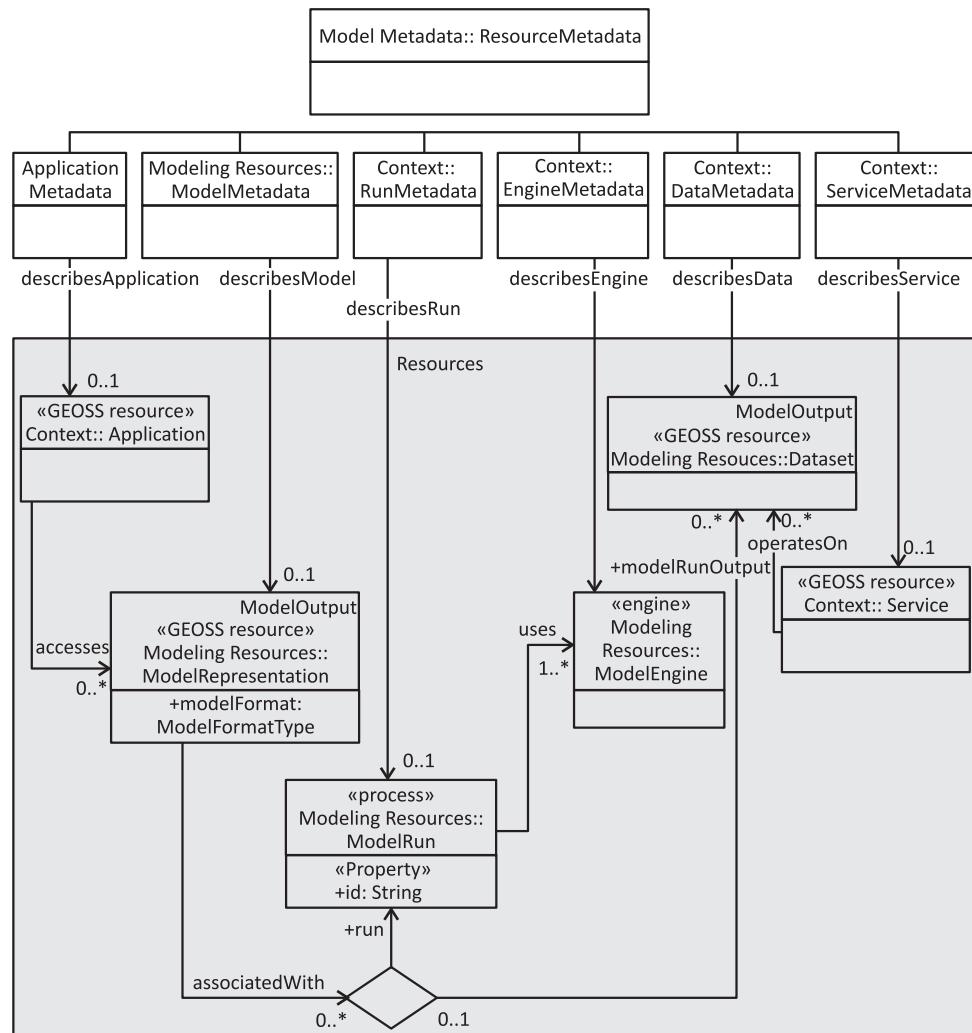


Рис. 7 Веб-модель структуры метаданных

За прошедшие десятилетия было предложено несколько архитектурных и технологических решений. Эти решения могут быть сгруппированы в две основные категории: автономные системы, основанные на мощных вычислительных узлах (суперкомпьютеры, кластеры и универсальные графические процессоры) и распределенные вычислительные инфраструктуры (Distributed Computing Infrastructures, DCIs) типа решеток и облаков, которые достигают высокой производительности благодаря общедоступному и скоординированному доступу

к ресурсам вычисления и хранения. Они отличаются технологиями, характеристиками и бизнес-моделями, но любое из них в зависимости от ситуации может использоваться и поддерживать геомодели и технологические процессы с высокими требованиями к вычислительной мощности и объему памяти.

4 Заключение

Опыт реализации геоинтегрированности показывает, что проблема геоинтегрированности — это в большой степени проблема стандартизации. Принятие стандартов для обеспечения интегрированности — центральный момент управления информационной инфраструктурой. При этом стандарты метаданных — центральный момент поддержки доступа к геоданным, их совместному использованию и актуализации, поэтому завершение разработки стандарта метаданных ISO 19115, конечно, ускорит развитие и других связанных с ним геостандартов.

Потенциальные пользователи геоданных заинтересованы в том, чтобы взаимодействующие решения различных приложений улучшали экономическую производительность и качество принятия решений, и выражают потребность в использовании геоинформационных стандартов, которые работают независимо от вычислительной платформы и языка, обеспечивая конкурентоспособность разработок.

Предполагается создание европейской базы данных по геостандартам, которая, как ожидают, обеспечит легкодоступный форум для распространения информации о пространственных стандартах ко всем пользователям, учитывая сравнительный анализ геоданных различных стран. Такая база данных должна улучшить понимание использования стандартов для обеспечения геоинтегрированности, а также семантических аспектов интегрированности геоданных.

Литература

1. Дуллин С. К., Дуллина Н. Г., Никишин Д. А. О проблемах реализации семантической геоинтегрированности в SEMANTIC WEB // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 2. С. 143–165.
2. Hjeltnes J., Moellering H., Cooper A., Delgado T., Rajabifard A., Rapant P., Danko D., Huet M., Laurent D., Aalders H., Iwaniak A., Abad P., Düren U., Martynenko A. An initial formal model for spatial data infrastructures // Int. J. Geogr. Inf. Sci., 2008. Vol. 22. P. 1295–1309.
3. ISO /IEC 10746:1998. Information technology—Open distributed processing—Reference model: Overview. — Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
4. ISO 19107:2003. Geographic information—Spatial schema. — Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
5. ISO 19125:1:2004. Geographic information — Simple feature access — Part 1: Common architecture. — Geneva: International Organization for Standardization, 2004.

6. ISO 19108:2002. Geographic information — Temporal schema. — Geneva: International Organization for Standardization, 2002.
7. ISO 19123:2005. Geographic information — Schema for coverage geometry and functions. — Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
8. ISO 19133:2005. Geographic information — Location-based services — Tracking and navigation. — Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
9. ISO 19134:2007. Geographic information — Location-based services — Multimodal routing and navigation. — Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
10. ISO 19141:2008. Geographic information — Schema for moving features. — Geneva: International Organization for Standardization, 2008.
11. ISO 19111:2007. Geographic information — Spatial referencing by coordinates. — Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
12. ISO 19113:2002. Geographic information — Quality principles. — Geneva: International Organization for Standardization, 2002.
13. ISO 19114:2003. Geographic information — Quality evaluation procedure. — Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
14. ISO/TS 19138:2006. Geographic information — Data quality measures. — Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
15. ISO 19115:2003. Geographic information — Metadata. — Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
16. ISO/TS 19139. Geographic information — Metadata — XML schema implementation. — Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
17. ISO 19115-2:2009. Geographic information — Metadata — Part 2: Extensions for imagery and gridded data. — Geneva: International Organization for Standardization, 2009.
18. ISO 19101:2002. Geographic information — Reference model. — Geneva: International Organization for Standardization, 2002.
19. ISO 19109:2005. Geographic information — Rules for application schema. — Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
20. ISO 19110:2005. Geographic information — Methodology for feature cataloguing. — Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
21. *Nativi S., Mazzetti P., Geller G. N.* Environmental model access and interoperability: The GEO ModelWeb initiative // Environ. Model. Softw., 2013. Vol. 39. P. 214–228.

Поступила в редакцию 26.01.15

GEOGRAPHICAL STANDARDS TO ENSURE GEOINTEROPERABILITY

S. Dulin^{1,2}, I. Rozenberg², and V. Umanskiy³

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

²Research & Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport (JSC NIIAS), Nizhegorodskaya Str., Moscow 109029, Russian Federation

³Close corporation “IntexGeoTrans,” 5-1 Orlikov per., Moscow 107996, Russian Federation

Abstract: The geographical standards developed by the leading organizations on standardization are discussed. Experience of realization of geointeroperability shows that the problem of geointeroperability is in large extent a problem of standardization. Acceptance of standards for maintenance of interoperability is the main part of management of an information infrastructure. Potential users of geodata wish that cooperating decisions of various applications improve economic productivity and quality of decision-making, and express need for use of geoinformation standards which work irrespective of a computing platform and language, providing competitiveness of development.

Keywords: geographical standards; geodata; semantic geointeroperability; ontology; Semantic Web

DOI: 10.14357/08696527150307

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 14-07-00040 and 14-07-00785).

References

1. Dulin, S. K., N. G. Dulina, and D. A. Nikishin. 2014. O problemakh realizatsii semanticheskoy geointeroperabil'nosti v Semantic Web [About problems of implementation of semantic geointeroperability in Semantic Web]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(2):143–165.
2. Hjelmager, J., H. Moellering, A. Cooper, T. Delgado, A. Rajabifard, P. Rapant, D. Danko, M. Huet, D. Laurent, H. Aalders, A. Iwaniak, P. Abad, U. Düren, and A. Martynenko. 2008. An initial formal model for spatial data infrastructures. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 22:1295–1309.
3. ISO/IEC 10746:1998. Information technology — Open distributed processing — Reference model: Overview. Geneva: International Organization for Standardization.

4. ISO 19107:2003. Geographic information — Spatial schema. Geneva: International Organization for Standardization.
5. ISO 19125:1:2004. Geographic information — Simple feature access — Part 1: Common architecture. Geneva: International Organization for Standardization.
6. ISO 19108:2002. Geographic information — Temporal schema. Geneva: International Organization for Standardization.
7. ISO 19123:2005. Geographic information — Schema for coverage geometry and functions. Geneva: International Organization for Standardization.
8. ISO 19133:2005. Geographic information — Location-based services — Tracking and navigation. Geneva: International Organization for Standardization.
9. ISO 19134:2007. Geographic information — Location-based services — Multimodal routing and navigation. Geneva: International Organization for Standardization.
10. ISO 19141:2008. Geographic information — Schema for moving features. Geneva: International Organization for Standardization.
11. ISO 19111:2007. Geographic information — Spatial referencing by coordinates. Geneva: International Organization for Standardization.
12. ISO 19113:2002. Geographic information — Quality principles. Geneva: International Organization for Standardization.
13. ISO 19114:2003. Geographic information — Quality evaluation procedure. Geneva: International Organization for Standardization.
14. ISO/TS 19138:2006. Geographic information — Data quality measures. Geneva: International Organization for Standardization.
15. ISO 19115:2003. Geographic information — Metadata. Geneva: International Organization for Standardization.
16. ISO/TS 19139. 2007. Geographic information — Metadata — XML schema implementation. Geneva: International Organization for Standardization.
17. ISO 19115-2:2009. Geographic information — Metadata — Part 2: Extensions for imagery and gridded data. Geneva: International Organization for Standardization.
18. ISO 19101:2002. Geographic information — Reference model. Geneva: International Organization for Standardization.
19. ISO 19109:2005. Geographic information — Rules for application schema. Geneva: International Organization for Standardization.
20. ISO 19110:2005. Geographic information — Methodology for feature cataloguing. Geneva: International Organization for Standardization.
21. Nativi, S., P. Mazzetti, and G.N. Geller. 2013. Environmental model access and interoperability: The GEO ModelWeb initiative. *Environ. Model. Softw.* 39:214–228.

Received January 26, 2015

Contributors

Dulin Sergey K. (b. 1950) — Doctor of Science in technology, professor; principal scientist, Research & Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport (JSC NIIAS), Nizhegorodskaya Str.,

Moscow 109029, Russian Federation; senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; s.dulin@ccas.ru

Rozenberg Igor N. (b. 1965) — Doctor of Sciences in technology, professor, First Deputy Director General, Research & Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport (JSC NIIAS), Nizhegorodskaya Str., Moscow 109029, Russian Federation; I.Rozenberg@gismps.ru

Umansky Vladimir I. (b. 1954) — Doctor of Sciences in technology, Director General, Close corporation “IntexGeoTrans,” 5-1 Orlikov per., Moscow 107996, Russian Federation; umanvi@yandex.ru

ВИРТУАЛЬНЫЕ ГЕТЕРОГЕННЫЕ КОЛЛЕКТИВЫ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

И. А. Кириков¹, А. В. Колесников², С. В. Листопад³, С. Б. Румовская⁴

Аннотация: Использование разнообразия мнений, дополнительности и сотрудничества знаний в коллективном интеллекте (КИ) для поиска решений присуще человеку. Семьи, племена, команды, компании, партии, армии, страны, действуя сообща, демонстрируют качественно лучшее интеллектуальное поведение в сложных ситуациях, непреодолимых для людей порознь. Однако в практике интеллектуальных систем поддержки принятия решений (СППР) опыт коллективного разума по-прежнему игнорируется. Предлагается подход к совершенствованию качества систем управления путем включения нового класса СППР — виртуальных гетерогенных коллективов (ВГК) — комбинации, с одной стороны, методов и технологий организации заочного взаимодействия экспертов для поддержки коллективного принятия решений и, с другой стороны, методов, технологий гибридных интеллектуальных систем для поддержки индивидуального принятия решений за круглым столом в условиях разнообразия информации. Опыт реализации элементов предлагаемого подхода демонстрирует его перспективность.

Ключевые слова: искусственный гетерогенный коллектив; гибридная интеллектуальная система; система поддержки принятия решений; системы поддержки принятия групповых решений; неигровые виртуальные миры; социальное программное обеспечение

DOI: 10.14357/08696527150308

1 Введение

Неотъемлемая часть деятельности человека — поиск решений в условиях большого числа факторов, неоднозначности оценки ситуации, ошибок в выборе приоритетов и противоречивости требований [1]. Результаты компьютерной имитации такой деятельности зависят от научной картины мира управления, психологии, лингвистики, инфокоммуникаций [2]. Однако субъекты научных

¹Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, baltbipiran@mail.ru

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта; Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, avkolesnikov@yandex.ru

³Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ser-list-post@yandex.ru

⁴Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sophiyabr@gmail.com

исследований и проектно-конструкторских работ часто игнорируют актуальность замены своих устаревших взглядов на новую картину мира, которая подразумевает принципы: (1) неоднородности (гетерогенности) мира и любого объекта, разнообразия жизни; (2) неопределенности границ объектов и связь «всего со всем»; (3) относительности любой иерархии и ее сочетания с горизонтальными связями; (4) дополнительности и сотрудничества; (5) полицентризма; (6) относительности знания; (7) соответствия управления сложности объекта. Из новой, четвертой картины мира следует, что структуре человеческого разума и КИ как оригиналам должны соответствовать междисциплинарные подходы, интегрирующие знания по СППР, системам поддержки принятия групповых решений (СППГР), КИ, гибридным и синергетическим интеллектуальным системам, визуальному мышлению и управлению, когнитивной компьютерной графике и инженерии образов. Каждый из них имеет достоинства и недостатки.

Основоположниками СППР считаются П. Дж. У. Кин, М. С. Скотт Мортон, Дж. Д. К. Литтл, С. Алтер. Среди отечественных ученых выделим работы О. И. Ларичева, А. Б. Петровского, Э. А. Трахтенгерца. Такие системы не дают решений или новых знаний, а поддерживают процесс выработки решения, автоматизируя рутинную обработку данных.

Основоположниками СППГР считаются П. Грей, Дж. П. Хабер, М. Туроф и С. Р. Хилтц. Эти системы организуют эффективную работу коллективов экспертов различных специальностей, которых не всегда можно найти и собрать вместе. Предназначение СППГР — автоматизация учета и контроля. Они не способствуют коллективному творчеству и генерации новых знаний.

Основы систем КИ заложили П. Леви, Г. Дженкинс, В. Турчин. Это технологии объединения экспертов из разных концов света для работы над общей задачей. При этом ослабляются положительные эффекты взаимодействия, затрудняется работа специалистов над своими подзадачами, представление на общее рассмотрение своего мнения и коммуникация участников.

На рубеже XX и XXI вв. знания по гибридным и синергетическим интеллектуальным системам изучены и обобщены в работах А. Н. Борисова, А. В. Гаврилова, И. А. Кирикова, А. В. Колесникова, Д. А. Поспелова, Г. В. Рыбиной, В. Б. Тарасова, И. Б. Фоминых, Н. Г. Ярушкиной, С. Гунэтилэйка (Suran Goonatilake), С. Кхеббала (Sukhdev Khebbal), Л. Медскера. Возможности таких систем по обработке визуально-образной информации и генерации новых знаний ограничены.

Исследования визуального мышления, введенного Р. Арнхейном, известны по работам Д. Пинка, Д. Сиббета, Д. Роэма, Г. Рейнольдса, Н. Даурте. Цель — развить творческие, правополушарные способности индивидуума в коллективе: умение совмещать части в целое, синтез, а не анализ, видеть отношения между разрозненными предметами, изобретать новое путем слияния элементов, не использовавшихся совместно.

Родоначальники когнитивной компьютерной графики — Д. А. Поспелов и А. А. Зенкин, а инженерии образов — И. Б. Фоминых, заложившие основную

терминологию и определившие задачи. Их идеи развили Б. А. Кобринский, В. Б. Тарасов, О. П. Кузнецов, Л. М. Чайлахян, Ю. Р. Валькман, В. М. Хачумов, А. А. Башлыков и А. Е. Ямпольская.

В настоящей работе предлагается новый класс интеллектуальных информационных систем — ВГК. Они представляют собой комбинацию методов организации заочного взаимодействия экспертов (КИ, виртуальных коллективов, виртуальных организаций), а также методов гибридных интеллектуальных систем для компьютерного моделирования поиска коллективных решений экспертов — искусственных гетерогенных коллективов (ИГК). Рассмотрим тенденции развития этих направлений.

2 Тенденции развития методов заочного взаимодействия экспертов

Истоки КИ — в «теореме присяжных» 1785 г. Николя де Кондорсé, французского математика: «если каждый участник голосования более склонен к неверному решению, то вероятность того, что высшее мнение группы есть правильное решение, возрастает с увеличением размерности группы» [3]. Подобные идеи есть и у Мортона Уилера (1911 г.) [4]: редукционизм и холизм муравьиной колонии, отдельные особи которой — клетки единого живого существа, «суперорганизма». Говард Блум [5] рассматривал коллективное поведение от кварков до людских сообществ, а в 1986 г. теоретически объяснил КИ в терминах сложных адаптивных систем и генетических алгоритмов.

Общепринятого определения КИ до сих пор нет, его рассматривают в разных «системах координат» [6–9]: (1) с когнитивной позиции соотносят «интеллект» «с главными познавательными способностями (англ. *cognitive powers*)» [9]: распознаванием, планированием действий, воображением, памятью, координацией и т. д.», а содержание «коллективного интеллекта» связывают с когнитивными способностями группы; цель КИ — понять и модернизировать коллективное обучение, накопление информации и творческий процесс; (2) с «эволюционной точки зрения» КИ — это эмерджентное свойство социальных групп любых размерностей, позволяющее им развиваться до высокоуровневой согласованности и сложности посредством таких инновационных механизмов, как «дифференциация–интеграция–трансформация» и «конкуренция–сотрудничество»; (3) КИ с позиции политической экономики — «общественный интеллект», воплощенный в коллективном знании общества и включенный во все способы его познания; (4) КИ типа «разум толпы», или краудсорсинг (англ. *wisdom of crowds*), [10] — «это разновидность партисипативной онлайн-активности, в которой индивид, институт, некоммерческая организация или компания предлагает группе индивидуумов, варьирующимся по знаниям, разнородности и численности, посредством гибкого свободного доступа взяться за задание различной сложности и модульности на волонтерских началах»; примеры краудсорсинговых проектов [11]: NASA Clickworkers — для анализа снимков марсианской поверхности астрономами-любителями; виртуальная биржа Супергу.ру, где участники прогнозируют

рост или падение ценных бумаг на бирже Российской торговой системы и Московской межбанковской валютной бирже.

Известны следующие формы КИ [12]: (1) «диалоговый КИ» — неоднородные группы участников отказываются от своих частных моделей мышления и вступают в диалог, оценивающий возникающее целое выше, чем его части: диалог Бома (англ. *Bohm dialogue*) [13] — свободный поток мнений между людьми в процессе коммуникации; «порождающий диалог» Отто Шармера (англ. *generative dialog*) [14] — эволюционная четырехстадийная модель диалога иллюстрирует, как личности и коллективы движутся от вежливой дискуссии к дебатам, затем к рефлексивному диалогу с самоисследованием и эмпатичным выслушиванием других и к форме КИ — «порождающему диалогу» — перенаправление каждого к возникающему знанию без ограничений и прислушивание к себе сквозь призму чужого представления; «просвещенные коммуникации» (англ. *enlightened communications*), термин Эндрю Коэна [15] — группа людей достигает высшего понимания вне собственного «Я»; (2) статистический КИ (англ. *statistical collective intelligence*) — индивидуумы, действующие независимо друг от друга в больших сообществах и успешно решая задачи коллективного познания, координации и прогнозирования (разум толпы); (3) человеко-машинный КИ (англ. *human-machine collective intelligence*) — использует синергию интеллекта человека и его электронных приложений, опираясь на лучшие свойства обоих; может поддерживать все другие формы КИ. Более полный обзор КИ можно найти в [13, 16].

Формальную модель феномена КИ в 2001 г. [17] получил Тадеуш Шуба из польской Академии горного дела и metallurgii, принимая его бессознательным, случайным, параллельным и распределенным вычислительным процессом, выполняемым в среде математической логики социальной системой. Существа и информация моделируются абстрактными информационными молекулами, несущими выражения на языке математической логики. Они квазислучайно перемещаются в зависимости от взаимодействия со своим окружением и от определенных для них перемещений. Их взаимодействие в абстрактной вычислительной среде создает многопотоковый процесс логических рассуждений, который Т. Шуба рассматривает как КИ. Данная теория — простое формальное определение КИ как свойства социальной структуры и работает для широкого спектра существ: от колоний бактерий до социальных структур людей.

Понятие социального программного обеспечения (англ. *social software*) развились в 1990-х гг. из понятия «групповое программное обеспечение» (англ. *groupware*), зародившегося в 1970-х гг. [18].

Хронологически первыми задумались об использовании компьютеров для поддержки принятия решений В. Буш, Дж. Ликлайдер и Д. Энгельбарт и предвосхитили появление в 1980-х гг. терминов: «программное обеспечение коллективного пользования», «коллективные системы поддержки принятия решений», «совместная работа на базе компьютеров» и «телефонференции». Еще в 1945 г. в статье [19] В. Буш предполагал, что его устройство «тетех» упростит

не только рутинную, но и интеллектуальную работу специалистов. Позднее Дж. Ликлайдер заложил основы ARPANET (1962–1964 гг.) и высказал идею со-зания объединения компьютеров в сеть со свободным доступом любого человека из любого места мира к ее ресурсам. Одновременно лаборатория Д. Энгель-барта, работая над совместным созданием документации, планированием базы данных коллективного пользования и контактами с применением мультимедиа, создала систему oNLine System [20], организовав с помощью нее первую телекон-ференцию, и рассматривала компьютер как способ «расширения возможностей человеческого интеллекта» (англ. *augmented intelligence*).

В 1970-х гг. Мюррей Туров создал технологию компьютерных коммуникаций для повышения качества решений, принимаемых групповой работой — electronic information exchange system. Затем Петер и Труди Джонсон-Ленц [21], продолжившие дело М. Турова, в 1978 г. ввели термин «groupware» как «ин-тенциональный групповой процесс плюс поддерживающее его программное обес-печениe». Ученых волновали проблемы человеко-машинного взаимодействия и основные принципы информационных систем. Результат — «компьютерные средства коллективной работы» (англ. *computer-supported collaborative or co-operative work*) — «мультидисциплинарные исследования компьютерных наук, экономики, социологии и психологии» для поиска теории и технологий колlek-тивной работы. Их следствие — трансформация термина «groupware» в книге Р. Йохансена [22] в термин «системы поддержки группового решения» (англ. *group decision support systems*) — интерактивные автоматизированные системы для принятия решений по неструктурированным вопросам лицами, работающим в группе [23]. Каждый из членов группы имеет персональный компьютер или рабочую станцию, соединенную с персональными компьютерами других членов группы, а также с одним или несколькими большими экранами общего пользова-ния. Проводит сессию модератор — «связной» между группой и компьютерной системой.

В начале 1990-х гг. появилось понятие «систем поддержки групп» (англ. *group support systems*) как общий взгляд на удовлетворение потребностей рабочих групп в поддержке принятия решений и коммуникациях [24] — автоматизи-рованные информационные системы для совместной интеллектуальной работы, коммуникации, общего пользования информацией и ее поиска, принятия ре-шений. В [25] ввели термин «электронные системы организации совещаний» (англ. *electronic meeting system*) как окружение, основанное на информацион-ных технологиях, поддерживающее групповые совещания, распределенные по времени и в пространстве. Задачи группы — коммуникация, решение про-блем, обсуждение вопросов, переговоры, разрешение конфликтов, системный анализ и проектирование, подготовка документов и совместное их использова-ние. Электронные системы организации совещаний включают СППГР, системы поддержки групп и компьютерные средства коллективной работы в сети.

В [26–28] синонимом «систем поддержки принятия групповых решений» слу-жит термин «системы поддержки ведения переговоров». Компьютерная система

поддержки групповых решений помогает экспертам в переговорах, согласовании решения, в связи участников вычислительной сетью. Она облегчает обмен предложениями и контрпредложениями, помогает оценить приоритеты составляющих проблем, генерацию компромиссных вариантов, моделирует последствия вариантов решений. Особо эффективны СППГР при комплексном подходе — от обучения переговорам до заключения соглашения по проблеме. Например, известно четыре варианта применения СППГР INSPIRE [27]: (1) учебные игры в принятии групповых решений; (2) инструмент подготовки к переговорам; (3) моделирование предстоящих переговоров; (4) поддержка и помощь в реальных переговорах. Программный комплекс «АЛЕСТАР ЭКСПЕРТ» [28] — помогает согласовать групповые решения по выбору лучшей альтернативы при тестировании сайтов на удобство эксплуатации. Системы GroupSystems и Sametime фирмы Lotus [29] обеспечивают асинхронную и синхронную генерацию идей, превращая коллективную работу в подобие обычного разговора между людьми, благодаря комбинированнию оповещения, общения и общих объектов.

В середине 1990-х гг. В. Б. Тарасов ввел понятие «виртуальных интеллектуальных организаций» [30] — сложных социотехнических систем, образованных из удаленных друг от друга групп людей, объединяемых на основе симбиоза ведущих сетевых и интеллектуальных технологий, например World Wide Web (WWW) и средств управления знаниями. В частности, виртуальная организация может фигурировать как искусственная организация из искусственных агентов. Одни и те же агенты могут одновременно входить в несколько виртуальных организаций. Центральная идея сети многоагентных систем (МАС) — организация взаимосвязей между интеллектуальными коллективными агентами: не постоянных и регулярных, а образующихся, развивающихся и трансформирующихся в зависимости от целей отдельных МАС.

К 1995 г. «groupware» выродилось в понятие «социальное программное обеспечение» (англ. *social software*) благодаря Клаю Ширки [31] из Нью-Йоркского университета, возвратившему термину первоначальное содержание — программное обеспечение, поддерживающее коммуникации в сколь угодно большой группе, включающее всё от электронной почты до безграничных трехмерных миров и неразрывно связанное с Интернетом.

Из разнообразия социального программного обеспечения для настоящей работы интересны неигровые виртуальные миры научных исследований, сотрудничества, визуализации информации и образования, аналогичные, например, модели Second Life от Virginia Tech, Nature Publishing Group и American Chemical Society's. Последняя [32] предоставляет техмерную визуализацию молекул и химических реакций. Неигровые виртуальные миры применяются в медицине [33].

В начале XXI в. появилось понятие «социального программного обеспечения» с позиции философии и социологии в работе профессора Р. Дж. Парика (City University of New York) [34] как междисциплинарной научно-исследовательской программы, использующей теорию игр, информатику для моделирования и ана-

лиза социальных ситуаций, проектирования целесообразных, объективных, точных и эффективных процедур, любых действий людей в различных сферах общественной жизни. В будущем «социальная информатика» (англ. *social computing*), в частности «социальное программное обеспечение», будет приближаться к «распределенному искусственному социальному интеллекту» (англ. *distributed artificial social intelligence*) [35]. В частности, к онлайн-интернет-сервисам типа Twine [36], с помощью искусственного интеллекта создающих и поддерживающих социальное взаимодействие пользователей WWW.

Рассмотренное выше разнообразие исследований КИ свидетельствует об эпистемологическом кризисе современного общества [6] — профессиональная информация производится быстрее, чем развивается способность экспертов полноценно осмысливать ее и встроить в общую систему знаний. Автоматизированные системы коллективного принятия решений лишь частично справляются с этой проблемой [6] в силу следующих причин: (1) они предназначены преимущественно для автоматизации рутинных процедур, а не для полноценного участия в генерации знаний и взаимодействия с экспертами на равных; (2) они усложняют мобилизацию и активизацию участников на решение проблем; (3) они ослабляют коллективные эффекты непосредственного взаимодействия экспертов; (4) из-за несовершенства человека-машинного взаимодействия они затрудняют работу экспертов над своими частями сложной задачи, представление на общее рассмотрение результатов решения и коммуникацию участников.

Таким образом, актуальны новые модели ВГК, интегрирующие КИ с ИГК и обеспечивающие своих членов независимо от природы возможностью «осмысления» информации, генерации и обмена знаниями, а также выполняющими функции лица, принимающего решения (ЛПР), по организации взаимодействий в коллективе.

3 Тенденции развития искусственных гетерогенных коллективов

Термин «искусственный гетерогенный коллектив», видовое отличие артефакта от артефактов «искусственная гетерогенная система», введен в информатику и управление А. В. Колесниковым [37] для обозначения моделей-артефактов, интегрирующих разнородные знания экспертов и способных имитировать не только отдельные линии рассуждений, но и комбинирование частных мнений в общее решение, как следствие актуальности моделирования неоднородности, разнообразия, сотрудничества, дополнительности и относительности знаний в естественном КИ — гетерогенных (разнородных) коллективах [38]. Эти коллективы эффективнее решают сложные проблемы при интенсивной творческой работе, в то время как гомогенные лучше справляются с простыми задачами. Центральное место среди ИГК занимают МАС, гибридные и синергетические системы.

Исследования МАС (распределенного, децентрализованного искусственного интеллекта, искусственной жизни по В. Б. Тарасову) ведутся более 30 лет.

Первые отечественные системы с автономными агентами — система ТАИР (транспортный автономный исследовательский робот) школы Н. М. Амосова и программа «Животное» М. М. Бонгарда. За рубежом первыми были Д. Ленат [39], К. Хьюитт [40] и В. Лессер [41]. Аналитические обзоры МАС даны В. Б. Тарасовым [30], В. И. Городецким [42] и В. Ф. Хорошевским [43].

Истории гибридных и синергетических систем искусственного интеллекта более 20 лет [44]. В Российской Федерации сложилось несколько научных школ в этой области: Д. А. Поспелова – В. Б. Тарасова; В. Н. Вагина – А. П. Еремеева; Г. В. Рыбиной в Москве; Н. Г. Ярушкиной в Ульяновске; В. Ф. Пономарева – А. В. Колесникова в Калининграде. Основные направления исследований по ИГК: (1) создание принципов разработки ИГК; (2) развитие языка системного анализа и моделирования гетерогенных проблемных инструментальных сред и функциональных гибридных интеллектуальных систем; (3) исследование сотрудничества логического (символьного) и когнитивного (образно-наглядного) моделирования коллективных рассуждений экспертов; (4) моделирование коллективных процессов в СППР, развитие новых классов интеллектуальных систем — гибридных интеллектуальных многоагентных систем, функциональных гибридных интеллектуальных систем (ФГиИС) с координацией, ФГиИС с гетерогенным визуальным полем; (5) исследование устойчивости решений на гибридах; (6) разработка методологии и технологии построения ИГК; (7) выработка принципов и методик по ИГК.

Искусственные гетерогенные коллективы способны на имеющемся гетерогенном модельном поле (ГМП) динамически синтезировать интегрированную модель естественного КИ и имитировать его работу по поиску решений в сложных ситуациях. Их существенный недостаток — возможность отображения сотрудничества в коллективе только с помощью логико-математического интеллекта, языковой коммуникации, левосторонней составляющей рассуждений экспертов и лица, принимающего коллективные решения, в условиях неоднородности и неопределенности информации, в то время как специалисты из разных предметных областей убеждены, что именно сочетание естественного и визуального языков в логико-математических и визуально-пространственных, правосторонних рассуждениях, т. е. сочетание языковой и визуальной коммуникации соответственно, при работе над проблемами релевантно феномену человеческого мышления. Такое разнообразие информации наиболее полно воссоздает задачу как условия запуска мыслительного процесса и формы взаимодействия с неопределенностью и качественно лучше воспринимается человеком. В результате возникает новая тенденция: создание нового класса интеллектуальных информационных систем — функциональных гибридных интеллектуальных систем с гетерогенным визуальным полем, способных динамически синтезировать интегрированную модель и метод над гетерогенным модельным и визуальным полями и имитировать сотрудничество, относительность и дополнительность КИ для поиска решений на символьных и визуальных языках.

4 Концептуальная модель виртуальных гетерогенных коллективов

Для исследования свойств и явлений в естественных гетерогенных коллективах принятия решений — малых группах — была предложена концептуальная модель, представленная на рис. 1 [45].

Ее существенный элемент — несколько моделей знаний экспертов и модель знаний ЛПР. Они формируют ГМП, над которым синтезируется модель КИ. Она позволяет изучить многоаспектное, стратифицированное представление сложной задачи, многоязыковые процессы принятия решений, процессы самоорганизации и формирования КИ, отношения и процессы взаимодействия экспертов очно, за круглым столом, отношения и процессы взаимодействия экспертов и ЛПР в ходе решения сложных задач, в частности координацию. Возможности концептуальной модели, представленной на рис. 1, еще не исчерпаны, однако рассмотренные выше тенденции и анонсирование нового класса интеллектуальных информационных систем в информатике — «виртуальных гетерогенных коллективов» требуют внесения изменений в концептуальную модель принятия коллективных решений (рис. 2).

Существенный элемент-нововведение — «аватара» (англ. *avatar*, санскр. *avatāra*, нисхождение, в russk. «воплощение, явление, проявление») [46] — индуистская модель проявления божества в мире. Впервые «аватара» применена в компьютерных играх в 1985 г., но не как графический образ человека в виртуальном мире, а как высшая ступень развития пользователя — цель игры. Ближе к искусственному интеллекту понятие использовалось в фантастическом фильме Дж. Кэмерона «Аватар» (корректный перевод с англ. «Аватара»). Здесь «аватар» — искусственный гибридный организм, способный к жизни только под

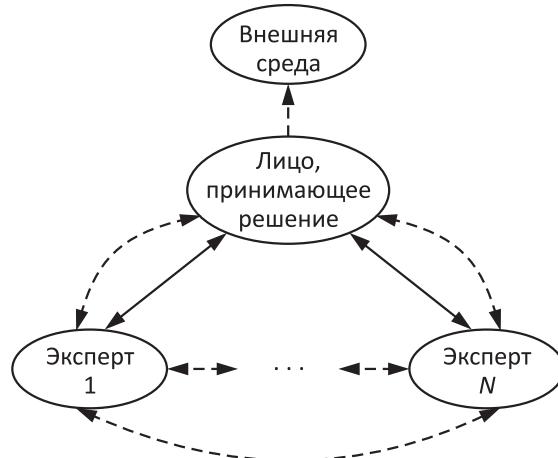


Рис. 1 Модель принятия коллективных решений в малых группах

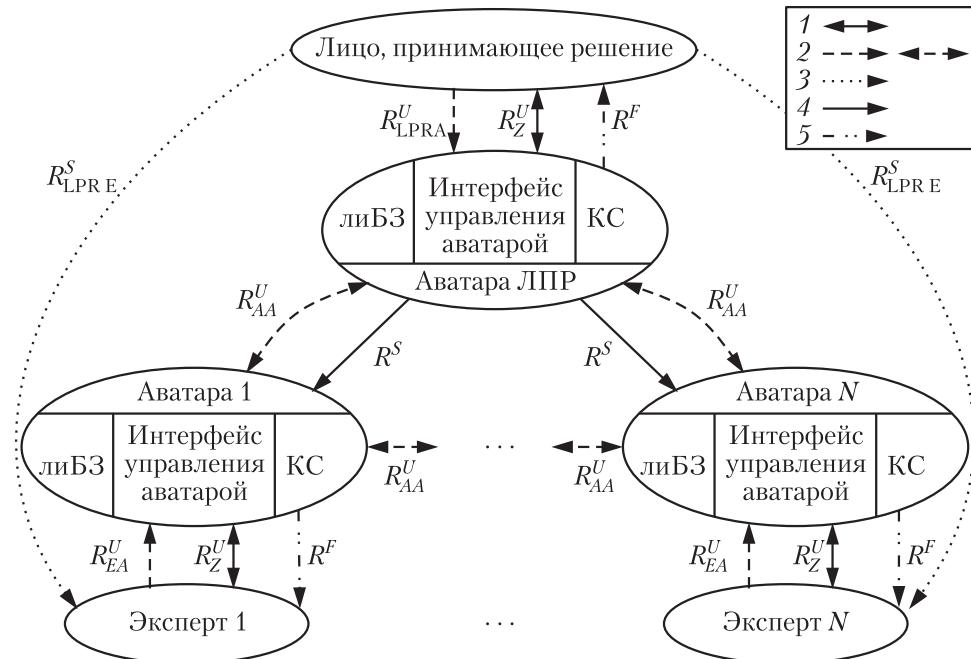


Рис. 2 Концептуальная модель коллектива виртуальных экспертов: 1 — отношение замены аватары на реального участника коллектива и наоборот; 2 — информационно-управляющие отношения «эксперт/ЛПР-аватара», «аватара-аватара»; 3 — отношения сотрудничества «ЛПР-эксперт»; 4 — отношения сотрудничества «аватара ЛПР/реальный ЛПР-аватара эксперта»; 5 — обратная связь аватары с реальным участником коллектива; КС — когнитивный образ субъекта; лиБЗ — база знаний с лингвистическими и иконическими символами

дистанционным управлением человеческого интеллекта. Человек с ограниченной моторикой воплощает в аватаре свои движения качественно лучше. Известны и медицинские виртуальные диагностические системы, например Virtual Medical Doctor [47], в которых врач-эксперт заменяется «аватарой», с которой предварительно беседует пациент. Здесь «аватара» — трехмерное или двухмерное графическое представление (воплощение) на экране компьютера эксперта, управляемое базой знаний.

Каждая из аватар коллектива виртуальных экспертов (см. рис. 2), решающих задачи из экономики, медицины, техники и др. — интеллектуальный объект, не имеющий аналога в реальной жизни коллектива, включающий: (1) собственную базу знаний (БЗ), использующую как лингвистические, так и иконические символы, опирающиеся на концепцию образных рядов или сходных проявлений образа [48], для обработки информации, поступающей от когнитивного образа

объекта — условий решаемой задачи, источника информации и для реальных, и для виртуальных участников коллектива; (2) когнитивный образ субъекта — процесса принятия решения аватарой, который способствует сокращению времени восприятия данных о процессе принятия решения коллективом аватар, анализируемых реальными экспертами и ЛПР; (3) интерфейс управления аватарой реальным экспертом (наблюдателем, контролером и аналитиком работы виртуального коллектива в процессе решения сложной задачи), посредством которого эксперт может либо включить «режим замещения аватары» — взять на себя все ее функции по принятию решения как анонимно, так и открыто (R_Z^U , стрелки 1 «отношений взаимозамены» реального эксперта/ЛПР и его аватары, см. рис. 2), либо включить «режим коррекции БЗ» — динамичное пополнение БЗ аватары непосредственно в процессе работы виртуального коллектива (R_{EA}^U , пунктирные стрелки «отношений воздействия» эксперта на свою аватару). Переход в «режим замещения аватары» или «режим коррекции БЗ» из «режима наблюдателя» (по умолчанию) определяется отношениями R^F обратной связи аватары и эксперта. При этом эксперт может принять субъективное мнение о замещении собой виртуального участника коллектива по информации, поступившей от когнитивного образа субъекта, либо реальный ЛПР-пользователь, также наблюдая за когнитивным образом субъектов и перейдя в «режим замещения» своей аватары, может послать директиву (R^S , стрелки 4 отношений сотрудничества «аватара ЛПР/реальный ЛПР – аватара эксперта» и отношения R^F , стрелки 5 обратной связи аватары и эксперта) эксперту через его аватару о включении «режима замещения». Отношения взаимозамены и отношения коррекции наследуют коммуникационные функции СППГР для ВГК и позволяют повысить качество и эффективность коллективного принятия решения. «Режим наблюдателя» может использоваться начинающими специалистами, студентами, магистрантами, аспирантами для тренировки навыков в выработке решений, а когнитивные образы объекта и субъектов ВГК будут способствовать повышению скорости передачи информации и уровня ее понимания, а также развитию интуиции, профессионального «чутья» и образного мышления.

Следуя концептуальной модели, показанной на рис. 1, эксперты заменяются их БЗ, формируется гетерогенное модельное поле и над ним синтезируется интегрированная модель, имитируя поведение коллективного интеллекта (моделируется логико-математический интеллект, левополушарный, естественно-языковый).

Эксперты заменяются их БЗ, включающими и лингвистические, и иконоческие символы [48], и формируется ГМП. При этом также формируются когнитивные визуальные образы субъектов (экспертов и ЛПР) и визуальный образ объекта управления (условий решаемой задачи) — получается визуальное гетерогенное поле. Затем имитируется поведение КИ (визуально-пространственный интеллект, правополушарный, творчество, озарение). Виртуальный

гетерогенный коллектив комбинирует при решении гетерогенное модельное поле и визуальное гетерогенное поле и, когда область явлений хорошо изучена, формализована (частично формализована), подключает для поиска решений опыт, профессиональные, теоретические знания экспертов из гетерогенного модельного поля, а когда есть существенная неопределенность, не снимаемая точным анализом и логико-математическим рассуждениями, приводит в действие механизмы визуально-пространственного, образного мышления ВГК, что позволяет имитировать «скакки» в гибридном пространстве состояний виртуального гетерогенного коллектива, соответствующие мгновенному интуитивному инсайту, озарению, прерывающему логико-математические рассуждения экспертов.

По умолчанию коллектив аватар формируется аватаром ЛПР (отношения сотрудничества «аватара ЛПР / реальный ЛПР – аватара эксперта» R^S , стрелки 4 на рис. 2), интерфейс и когнитивный элемент которой активны изначально, из ГМП с возможностью подключения ВГК по результатам анализа степени неопределенности ситуации или по решению ЛПР-пользователя. При этом реальный ЛПР может скорректировать процесс формирования коллектива для решения конкретной поставленной задачи. Аватарами могут быть взаимно однозначно со-поставлены: (1) модели знаний одного эксперта (ведущего в организации, для которой формируется коллектив виртуальных экспертов, или ведущего в рассматриваемой проблемной области); (2) либо интегрированной модели знаний теоретических и эвристических нескольких экспертов — одной или разных научных школ — профессионалов в своей области; (3) либо модели знаний, извлеченных из больших баз экспериментальных данных, если виртуальный коллектив планируется как универсальный для любой организации в данной области приложения. Коллектив реальных экспертов набирается реальным ЛПР-пользователем ВГК (R_{LPRE}^S , отношения сотрудничества «ЛПР–эксперт», стрелк 3 на рис. 2) и может быть собирательным со всего мира либо в одной целевой организации, причем эксперты, работающие с ВГК, могут не быть источниками знаний для БЗ аватар на этапе подготовки виртуального коллектива к работе в данной организации.

Информационно-управляющие отношения R_{AA}^U (на рис. 2 показаны двойными пунктирными стрелками) отображают взаимодействие участников коллектива (только аватар или только реальных экспертов при замещении всех аватар либо аватар и экспертов при частичном замещении аватар), в том числе подчиненности или объединения одной профессией, а также обмен данными, знаниями, объяснениями и частичными решениями общей задачи.

Концептуальная модель на рис. 2 — ответ на увеличение темпов развития групповых СППР, переносимых в неигровые виртуальные миры, повышения интерактивности интерфейсов СППР за счет средств когнитивной компьютерной графики и развития моделирования социальных процедур. Это и определило актуальность *виртуальных гетерогенных коллективов* — искусственных интеллектуальных гетерогенных систем с когнитивной составляющей, моделирующих

работу КИ, принимающего решения, в смысле Г. Гарднера, члены которых — виртуальные интеллектуальные аватары (двух- или трехмерные образы экспертов и ЛПР), процедуры взаимодействия между которыми в виртуальной среде моделируются методами и средствами социального программного обеспечения в смысле Р. Дж. Парика.

Таким образом, принципиальное отличие виртуального гетерогенного от традиционного коллектива заключается в том, что полноценными участниками первого могут быть как люди, так и виртуальные эксперты (аватары). В таких коллективах средства вычислительной техники не просто формируют среду для общения, а виртуальные эксперты принимают непосредственное участие в решении возникающих перед коллективом задач. Вторая особенность — это применение средств когнитивной компьютерной графики [49], визуально-го мышления [50] и визуального управления [51]. В частности, Д. Сиббет, один из теоретиков и практиков визуального мышления, в [50] предлагает в качестве подхода к тому, чтобы сделать рабочую группу, КИ еще умнее, использование игрушечных фигурок, карт с картинками, любых предметов из окружающего мира для визуальных акцентов во время общения с собеседником. Он выделил свойства работы со зрительными образами и графическими метафорами, помогающие задействовать визуальное мышление: (1) визуальная фиксация обсуждаемого мгновенно дает понять выступающим за круглым столом, что они услышаны — верbalными средствами такого не достичь; (2) визуализация интеллекта высоко интегративна: совместно работают зрительные и речевые участки коры головного мозга; (3) графически воспроизведенная информация сглаживает контраст противоречивых мнений экспертов, обычно усиливаемый в разговоре; (4) графические метафоры позволяют экспертам и ЛПР показывать свое отношение к вещам; визуальные образы будят воображение, выявляют надежды, мечты и намерения; (5) визуальная информация отсылает к отдельным словам или образам и создает цельную картину с внутренними взаимосвязями; перевод слова в зримый образ помогает участнику КИ осознать наличие в обоих языках устойчивого смысла моделей.

Специалисты из разных предметных областей убеждены, что именно сочетание естественного и визуального языков в логико-математических и визуально-пространственных рассуждениях, т. е. сочетание языковой и визуальной коммуникации соответственно, при работе над проблемами релевантно феномену человеческого мышления. В результате возникает необходимость создания нового класса интеллектуальных информационных систем — *виртуальных гетерогенных коллективов*, объединяющих в себе методы организации заочного взаимодействия экспертов в СППГР с визуальным гетерогенным полем и способные динамически синтезировать интегрированную модель и метод над гетерогенным модельным и визуальным полями и имитировать сотрудничество, относительность и дополнительность КИ для поиска решений на символьных и визуальных языках.

5 Опыт разработки виртуальных гетерогенных коллективов

Элементы ВГК просматриваются в «виртуальных консилиумах» для медицинской диагностики [52], «виртуальных планерках» в машиностроении [53] и «виртуальных круглых столах» в транспортной логистике [54].

Виртуальный консилиум для медицинской диагностики [52]. Идея виртуального консилиума для диагностики артериальной гипертензии — повышение качества индивидуальных врачебных решений за счет консультаций у компьютерной модели, имитирующей работу медицинского консилиума — искусственной гетерогенной системы, моделирующей коллективные решения, разнообразие хранимой и перерабатываемой информации в которой релевантно разнообразию информации в диагностических ситуациях. Здесь рассмотрен один из аспектов построения ВГК как функциональной гибридной интеллектуальной диагностической системы со свойствами дополнительности, сотрудничества и относительности знаний, динамически синтезирующей интегрированные методы и модели, разнообразие которых релевантно разнообразию нескольких профессиональных точек зрения на состояние организма пациента. Профессиональный состав виртуального консилиума — кардиолог, невролог, нефролог, терапевт, эндокринолог, уролог, а число решаемых ими подзадач — 21. Разработано гетерогенное модельное поле из 23 моделей методами нечетких экспертных систем, искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов.

По итогам лабораторных экспериментов на материалах клинической больницы прототип «Виртуального консилиума» давал верный диагноз в 80% случаев. При этом время, затрачиваемое врачом на постановку диагноза, уменьшилось примерно на 20%. Виртуальный консилиум имеет хорошие перспективы совершенствования до ВГК. Для этого предполагается организовать сотрудничество моделей экспертов в нечеткой логике и картиенно-образного, когнитивного моделирования состояния пациента. Планируются также и работы по встраиванию ВГК в естественные медицинские консилиумы, когда врач-эксперт сможет не только наблюдать за поведением искусственного коллектива, но и «занять место коллеги», врача-аватары, тем самым подключив свои знания и опыт к общей дискуссии и поиску консенсуса.

Виртуальная планерка для оперативно-производственного планирования [53]. Идея этой работы — повышение качества оперативных план-графиков машиностроительного производства с мелкосерийным заказным характером производства в концепции визуального управления. Здесь моделируется координация ЛПР (начальник производственного отдела) ежедневной коллективной работы пяти экспертов: главного конструктора, главного технолога, начальника отдела материально-технического снабжения, начальника электромеханического цеха, начальника отдела продаж. Рассуждения экспертов и ЛПР имитируются продукционными экспертными системами. Разработана визуализация виртуальной планерки: движущимися кругами показывается, от кого и к кому идет передача информации, а фон под текстом эксперта, передающего информацию,

переливается цветами. Картина-образ планерки — стол с сидящими за ним людьми. Последовательность таких образов формирует динамический образ коллективных обсуждений. При переходе от одной планерки к другой имитируется передвижение «круглых столов» под «увеличительным стеклом». Пользователь, выбирая тот или иной образ, может получать развернутое текстовое описание хода соответствующей планерки. Стрелками на часах отображается модельное время с начала решения задачи. Показывается и календарная дата каждой планерки.

Лабораторные эксперименты на материалах конкретного объекта показали, что если относительная погрешность результатов решения задачи оперативного планирования без учета координации достигает 36%, то с ее учетом не превышает 1%.

Виртуальный круглый стол для транспортной логистики [54]. Идея состоит в сотрудничестве технологии функциональных гибридных интеллектуальных систем, релевантных неоднородности сложной транспортно-логистической задачи, а также многоагентного подхода для моделирования самоорганизации на основе анализа согласованности целей экспертов в новом классе интеллектуальных информационных систем — гибридных интеллектуальных МАС (ГиИМАС). Здесь моделируется коллективная работа горизонтальных структур крупных транспортно-логистических и транспортно-экспедиционных компаний. Под управлением менеджера по логистике (ЛПР, логист) в обсуждении и принятии решений могут участвовать руководители служб хранения, подготовки отгрузок, контроля, упаковки, экспедиторской, грузовой, транспортной, диспетчерской и претензионной.

Система динамически перестраивает алгоритм своего функционирования, каждый раз при работе над сложной задачей вырабатывая релевантный ей метод решения. По итогам практического использования ГиИМАС на двух объектах средняя суммарная себестоимость и длительность доставки грузов в день сократилась на 7,2% и на 12,13% соответственно, среднее время построения маршрутов в день уменьшилось на 23,14%.

6 Заключение

Аналитический обзор подходов к «коллективному интеллекту» показал не только актуальность исследований в этой области, но и специфицировал несколько основных направлений: (1) применение средств и систем телекоммуникации для организации и работы коллективов территориально распределенных специалистов — виртуальных коллективов; (2) применение методов математики и технологий искусственного интеллекта, виртуальной реальности для моделирования процессов выработки и принятия коллективных решений — ВГК; (3) разработка агентов-аватар, когда эксперты ВГК могут проявить свои профессиональные знания, опыт и рассуждения, интеллект над аспектом сложной ситуации, заняв место виртуальной сущности; это путь встраивания, интеграции модельной составляющей в горизонтальные управляемые коллективы.

Элементы ВГК апробированы на «виртуальном консилиуме» для диагностики артериальной гипертензии в медицинской информатике, «виртуальной планерке» для сложной задачи разработки оперативного плана-графика мелкосерийного заказного машиностроительного производства и «виртуальном круглом столе» для сложной транспортно-логистической задачи. Подобные автоматизированные системы отображают гетерогенность, сотрудничество, дополнительность и относительность знаний естественных систем и сопоставляют разнообразию условий и ситуаций решения сложных задач коллективом не единственный инструмент, а множество динамически синтезируемых моделей. Это открывает путь компьютерным системам визуального управления к сложным задачам, с которыми сейчас справляются только коллективы экспертов.

Проблемы в любой системе коллективного принятия решений необходимо делать видимыми, контрастными, что обуславливает возможность профессионального управления процессом и его совершенствования. В результате актуально создание механизмов искусственного КИ с сотрудничающими и дополняющими друг друга логико-математическими и визуально-пространственными методами и моделями мышления экспертов и ЛПР. Один из таких механизмов, отражающий новую социальную, системную парадигму искусственного интеллекта, — виртуальные гетерогенные коллективы.

Литература

1. Трахтенгерц Э. А. Компьютерные системы поддержки принятия управленческих решений // Проблемы управления, 2003. Вып. 1. С. 13–28.
2. Колесников А. В. Моделирование естественных гетерогенных систем коллективного принятия решений // Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2015): Труды 6-й Междунар. конф. — М., 2015. Т. 1. С. 7–16.
3. Landemore H. Democratic reason: Politics, collective intelligence, and the rule of the many. — Princeton: Princeton University Press, 2012. 304 p.
4. Wheeler W. M. The ant-colony as an organism // J. Morphology, 1911. Vol. 22. No. 2. P. 307–325. doi: 10.1002/jmor.1050220206.
5. Bloom H. Global brain: The evolution of mass mind from the big bang to the 21st century. — New York, NY, USA: Wiley, 2000. 370 p.
6. Por G. Collective intelligence and collective leadership: Twin paths to beyond chaos. <http://action-town.eu/wp-content/uploads/2010/02/CI-Collective-Leadership-by-George-P%C3%B3r.pdf>.
7. Por G. From right mindfulness to collective. <http://www.phibetaiota.net/wp-content/uploads/2015/01/Spanda-CI-POR-GEORGE-From-right-mindfulness-to-collective-intelligence.pdf>.
8. Henshall S. Social software and CI? <http://bit.ly/1BQCbhd>.
9. Lévy P. Frequently asked questions about collective intelligence. <http://tinyurl.com/2r2jgr>.
10. Estellés-Arolas E., González-Ladrón-de-Guevara F. Towards an integrated crowdsourcing definition // J. Inform. Sci., 2012. Vol. 38. No. 2. P. 189–200. doi:10.1177/0165551512437638.

11. *Xay Д.* Краудсорсинг: Коллективный разум как инструмент развития бизнеса / Пер. с англ. — М.: Альпина Паблишер, 2012. 288 с. (*Howe J.* Crowdsourcing: Why the power of the crowd is driving the future of business. — New York, NY, USA: Crown Publishing Group, 2008. 320 р.)
12. *Atlee T.* Defining collective intelligence. http://www.communityintelligence.com/blogs/public/2004/08/defining_collective_intelligence.html.
13. *Bohm D., Krishnamurti J.* The ending of time // ANPA West J., 1997. Vol. 7. No. 1. P. 25–26.
14. *Gunnlaugson O.* Revisioning possibilities for how groups learn together: Venturing an AQAL model of generative dialogue // Integral Review, 2007. Vol. 3. No. 1. P. 44–58.
15. *Cohen A., Chopra D.* Evolutionary enlightenment: A new path to spiritual awakening. — New York, NY, USA: Select Books, 2011. 213 p.
16. *Atlee T., Pór G.* Collective intelligence as a field of multi-disciplinary study and practice. <http://www.evolutionarnexus.org/node/606>.
17. *Szuba T.* Computational collective intelligence. — New York, NY, USA: Wiley, 2001. 420 р.
18. Чертняк Л. Долгий путь к социальному программному обеспечению // Открытые системы, 2007. № 1. <http://www.ospru/os/2007/01/3999180>.
19. *Bush V.* As we may think // The Atlantic, 1945. No. 7. <http://www.theatlantic.com/magazine/archive/1945/07/as-we-may-think/303881/1>.
20. *Tweney D.* Dec. 9, 1968: The mother of all Demos // Wired News, 12.09.08. http://archive.wired.com/science/discoveries/news/2008/12/dayintech_1209.
21. Groupware: Coining and defining it. <http://nexus.awakentech.com:8080/at/Awaken.nsf/d4cbbb795713bdee882564640074729d/0530daecb494886c882564650065e418?OpenDocument>.
22. *Johansen R.* GroupWare: Computer support for business teams. — New York, NY, USA: The Free Press, 1988. 205 p.
23. *De-Sanctis G., Gallupe R. B.* Group decision support systems: A new frontier // DATA BASE, 1985. Vol. 16. No. 2. P. 3–10.
24. *Jessup L. M., Valacich J. S.* Information systems foundations. — Indianapolis, IN, USA: Que Education and Training / Macmillan Publishing Co, 1999. 576 p.
25. *Dennis A. R., Gallupe R. B.* A history of Group Support Systems. Empirical research: Lessons learned and future directions // Group Support Systems: New perspectives / Eds. L. M. Jessup, J. S. Valacich. — New York, NY, USA: Macmillan Publishing Co., 1993. P. 59–77.
26. *Файнзильберг Л. С.* Обучаемая система поддержки коллективного решения группы независимых экспертов // Управляющие системы и машины, 2003. № 4. С. 62–67.
27. *Трахтенгерц Э. А.* Компьютерная поддержка переговоров при согласовании управленческих решений. — М.: Синтег, 2003. 181 с.
28. *Старцев А. В.* Модели согласования экспертных оценок в процедурах группового выбора: Дис. . . . канд. техн. наук. — М.: РГБ, 2004. 122 с.
29. Системы и технологии организационной деятельности. http://www.tsput.ru/res/informat/pers_orgproject_site/lekziya/tema06/kontent6.htm.
30. *Тарасов В. Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.

31. *Shirky C.* Social software and the politics of groups. http://www.shirky.com/writings/herecomeseverybody/herecomeseverybody/group_politics.html.
32. Chemistry in second life // Chemistry Central J., 2009. Vol. 3. Art. No. 14. <http://journal.chemistrycentral.com/content/3/1/14>.
33. Пять медицинских применений виртуальной реальности // Econet, 2014. <http://econet.ru/articles/58686-pyat-meditsinskikh-primeneniy-virtualnoy-realnosti>.
34. *Parikh R.* Social software // Synthese, 2002. Vol. 132. No. 3. P. 187–211.
35. *Давыдов А. А.* Развитие интернет-технологий — вызов современной российской социологии. — М.: ИСАН, 2008. http://www.isras.ru/index.php?page_id=957.
36. *Давыдов А. А.* Twine: искусственный интеллект создает социальные взаимодействия. — М.: ИСАН, 2009. http://www.isras.ru/index.php?page_id=974.
37. *Колесников А. В.* Принципы и методология разработки информационных гетерогенных систем двунаправленной гибридизации // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. научн. тр. VIII Междунар. науч.-практич. конф. — М.: Физматлит, 2015. Т. 1. С. 36–53.
38. *Крупцица В. В.* Личность. Коллектив. Стиль отношений. — Н. Новгород: ВГИПА, 2003. 385 с.
39. *Lenat D.* BEINGS: Knowledge as interacting experts // IJCAI-75: 4th Joint Conference (International) on Artificial Intelligence Proceedings. — San Mateo: Morgan Kaufmann Publ., 1975. P. 126–133.
40. *Hewitt C.* Viewing control structures as patterns of message passing // Artificial Intelligence, 1977. Vol. 8. No. 3. P. 323–364.
41. *Erman L., Hayes-Roth F., Lesser V., Reddy D.* The HEARSAY-2 speech understanding system: Integrating knowledge to resolve uncertainty // ACM Computers Surveys, 1980. Vol. 12. No. 2. P. 213–253.
42. *Городецкий В. И.* Многоагентные системы: основные свойства и модели координации поведения // Информационные технологии и вычислительные системы, 1998. № 1. С. 22–34.
43. *Хорошевский В. Ф.* Поведение интеллектуальных агентов: модели и методы реализации // 4-й Междунар. семинар по прикладной семиотике, семиотическому и интеллектуальному управлению: Сб. научн. тр. — Переславль-Залесский: РАИЙ, 1999. С. 5–20.
44. *Колесников А. В.* Гетерогенные естественные и искусственные системы // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. научн. тр. 7-й Междунар. научн.-технич. конф. — М.: Физматлит, 2013. Т. 1. С. 86–103.
45. *Колесников А. В., Кириков И. А.* Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. — М.: ИПИ РАН, 2007. 387 с.
46. Православная энциклопедия / Под ред. патриарха Московского и всея Руси Кирилла. — М.: Православная энциклопедия, 2000. Т. 1. С. 77–78.
47. *Загорулько Ю. А., Загорулько Г. Б.* Использование онтологий в экспертных системах и системах поддержки принятия решений. <http://www.myshared.ru/slides/92940>.
48. *Кобринский Б. А.* Образные представления специалиста и проблема их отражения в интеллектуальных системах // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (Open Semantic Technologies for Intelligent

- Systems — OSTIS-2012): Мат-лы II Междунар. научн.-технич. конф. — Минск: БГУИР, 2012. С. 53–62.
49. Искусственный интеллект. — В 3-х кн. Кн. 2: Модели и методы: Справочник / Под ред. Д. А. Поспелова. — М.: Радио и связь, 1990. 304 с.
 50. Сиббет Д. Визуализируй это! Как использовать графику, стикеры и интеллект-карты для командной работы / Пер. с англ. П. Ракитина. — М.: Альпина Паблишер, 2014. 280 с. (*Sibbet D. Visual meetings: How graphics, sticky notes and idea mapping can transform group productivity.* — New York, NY, USA: Wiley, 2010. 288 p.).
 51. Ortiz C. A., Park M. R. Visual controls: Applying visual management to the factory. — New York, NY, USA: CRC Press, 2011. 180 p.
 52. Кириков И. А., Колесников А. В., Румовская С. Б. Исследование лабораторного прототипа искусственной гетерогенной системы для диагностики артериальной гипертензии // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 3. С. 121–143. doi: 10.14357/08696527130208.
 53. Колесников А. В., Солдатов С. А. Моделирование коллективного интеллекта, решающего сложную задачу планирования на машиностроительном предприятии // В мире научных открытий. Сер. Математика. Механика. Информатика, 2011. № 12. С. 172–181.
 54. Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В. Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. — М.: ИПИ РАН, 2014. 189 с.

Поступила в редакцию 19.08.15

VIRTUAL HETEROGENEOUS COLLECTIVES FOR SUPPORTING DECISION-MAKING

I. A. Kirikov¹, A. V. Kolesnikov^{1,2}, S. V. Listopad¹, and S. B. Rumovskaya¹

¹Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation

²Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation

Abstract: It is natural for a human being to use variety of opinions, complementarity and collaboration of knowledge for decision making in collective intelligence. Families, tribes, teams, companies, parties, armies, countries acting together demonstrate higher-quality intellectual behavior in complex situations insuperable for individuals. However, the skills of collective intelligence are ignored in the practice of intellectual decision support systems. The paper introduces a new approach to improvement of quality of supervision systems by means of a new class of decision support systems — virtual heterogeneous collectives — the combination of methods and technologies of distance expert

interactions for collective decision support, from one side, and methods and technologies of hybrid intelligence systems for individual decision support at round desk in the conditions of information multiplicity, from the other side. The practice of development of the elements of the proposed approach demonstrates its potentiality.

Keywords: artificial heterogeneous collective; hybrid intelligence system; decision support systems; group decision support systems; non-game virtual worlds; social software

DOI: 10.14357/08696527150308

References

1. Traxtengerc, E. A. 2003. Komp'yuternye sistemy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy [Computer systems for supporting management decision-making]. *Problemy Upravleniya* [Management Problems] 1:13–28.
2. Kolesnikov, A. V. 2015. Modelirovaniye estestvennykh geterogenykh sistem kollektivnogo prinyatiya resheniy [Modeling of the natural heterogeneous systems of collective decision-making]. *6th Conference (International) "Systems Analysis and Information Technology" Proceedings*. Moscow. 1:7–16.
3. Landemore, H. 2012. Democratic reason: Politics, collective intelligence, and the rule of the many. Princeton: Princeton University Press. 304 p.
4. Wheeler, W. M. 1911. The ant-colony as an organism. *J. Morphology* 22(2):307–325. doi: 10.1002/jmor.1050220206.
5. Bloom, H. 2000. Global brain: The evolution of mass mind from the big bang to the 21st century. New York, NY: Wiley. 370 p.
6. Por, G. Collective intelligence and collective leadership: Twin paths to beyond chaos. Available at: <http://action-town.eu/wp-content/uploads/2010/02/CI-Collective-Leadership-by-George-P%C3%B3r.pdf> (accessed March 15, 2015).
7. Por, G. From right mindfulness to collective. Available at: <http://www.phibetaiota.net/wp-content/uploads/2015/01/Spanda-CI-POR-GEORGE-From-right-mindfulness-to-collective-intelligence.pdf> (accessed March 15, 2015).
8. Henshall, S. Social software and CI? Available at: <http://bit.ly/1BQCbhd> (accessed March 15, 2015).
9. Lévy, P. Frequently asked questions about collective intelligence. Available at: <http://tinyurl.com/2r2jgr> (accessed March 15, 2015).
10. Estellés-Arolas, E., and F. González-Ladrón-de-Guevara. 2012. Towards an integrated crowdsourcing definition. *J. Inform. Sci.* 38(2):189–200. doi: 10.1177/0165551512437638.
11. Howe, J. 2008. Crowdsourcing: Why the power of the crowd is driving the future of business. New York, NY: Crown Publishing Group. 320 p.
12. Atlee, T. Defining collective intelligence. Available at: http://www.communityintelligence.com/blogs/public/2004/08/defining_collective_intelligence.html (accessed March 20, 2015).
13. Bohm, D., and J. Krishnamurti. 1997. The ending of time. *ANPA West J.* 7(1):25–26.

14. Gunnlaugson, O. 2007. Revisioning possibilities for how groups learn together: Venturing an AQAL model of generative dialogue. *Integral Review* 3(1):44–58.
15. Cohen, A., and D. Chopra. 2011. Evolutionary enlightenment: A new path to spiritual awakening. New York, NY: Select Books. 213 p.
16. Atlee, T. and G. Pór. Collective intelligence as a field of multi-disciplinary study and practice. Available at: <http://www.evolutionarnexus.org/node/606/> (accessed March 20, 2015).
17. Szuba, T. 2001. Computational collective intelligence. New York, NY: Wiley. 420 p.
18. Chernjak, L. 2007. Dolgiy put' k sotsial'nomu programmnomu obespecheniyu [The long way to social software]. *Otkrytye Sistemy* [Open Systems] 1. Available at: <http://www.osp.ru/os/2007/01/3999180/> (accessed March 10, 2015).
19. Bush, V. 1945. As we may think. *The Atlantic* 7. Available at: <http://www.theatlantic.com/magazine/archive/1945/07/as-we-may-think/303881/1/> (accessed March 30, 2015).
20. Tweney, D. 12.09.08. Dec. 9, 1968. The mother of all demos. *Wired News*. Available at: http://archive.wired.com/science/discoveries/news/2008/12/dayintech_1209/ (accessed April 5, 2015).
21. Groupware: Coining and defining it. Available at: [http://nexus.awakentech.com:8080/at/Awaken.nsf/d4cbbb795713bdee882564640074729d/0530daecb494886c882564650065e418?OpenDocument/](http://nexus.awakentech.com:8080/at/Awaken.nsf/d4cbbb795713bdee882564640074729d/0530daecb494886c882564650065e418?OpenDocument) (accessed April 1, 2015).
22. Johansen, R. 1988. GroupWare: Computer support for business teams. New York, NY: The Free Press. 205 p.
23. De-Santis, G. and R. B. Gallupe. Group decision support systems: A new frontier. *DATA BASE* 16(2):3–10.
24. Jessup, L. M., and J. S. Valacich. 1999. Information systems foundations. Indianapolis, IN: Que Education and Training / Macmillan Publishing Co. 576 p.
25. Dennis, A. R., and R. B. Gallupe. 1993. A history of Group Support Systems. Empirical research: Lessons learned and future directions. *Group Support Systems: New perspectives*. Eds. L. M. Jessup and J. S. Valacich. New York, NY: Macmillan Publishing Company. 59–77.
26. Fajnzil'berg, L. S. 2003. Obuchaemaya sistema podderzhki kollektivnogo resheniya gruppy nezavisimykh ekspertov [Trainee system of collective decision support by the group of independent experts]. *Upravlyayushchie Sistemy i Mashiny* [Control Systems and Machines] 4:62–67.
27. Trahtengerc, E. A. 2003. Komp'yuternaya podderzhka peregovorov pri soglasovanii upravlencheskikh resheniy [Meeting computer support during concurrence of management decisions]. Moscow: Sinteg. 181 p.
28. Starcev, A. V. 2004. Modeli soglasovaniya ekspertnykh otsenok v protsedurakh grup-povogo vybora [Models of experts evaluations concurrence in the procedures of collective selection]. D.Sc. Thesis. Moscow: RGB. 122 p.
29. Sistemy i tekhnologii organizatsionnoy deyatel'nosti [Systems and technologies of management]. Available at: [http://www.tput.ru/res/informat/pers.orgproject-site/lekziya/tema06/kontent6.htm/](http://www.tput.ru/res/informat/pers.orgproject-site/lekziya/tema06/kontent6.htm) (accessed April 15, 2015).
30. Tarasov, V. B. 2002. Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: Filosofiya, psichologiya, informatika [From multiagent systems to intellectual organizations]. Moscow: Editorial URSS. 352 p.

31. Shirky, C. Social software and the politics of groups. Available at: http://www.shirky.com/writings/herecomeseverybody/herecomeseeverybody/group_politics.html/ (accessed April 5, 2015)
32. Chemistry in second life. 2009. *Chemistry Central J.* 3(14). Available at: <http://journal.chemistrycentral.com/content/3/1/14/> (accessed March 27, 2015).
33. Pyat' meditsinskikh primeneniya virtual'noy real'nosti [Five medical application of virtual reality]. 2014. *Econet*. Available at: <http://econet.ru/articles/58686-pyat-meditsinskikh-primeneniya-virtualnoy-realnosti/> (accessed March 27, 2015).
34. Parikh, R. 2002. Social software. *Synthese* 132(3):187–211.
35. Davydov, A. A. 2008. Razvitiye internet-tehnologiy — vyzov sovremennoy rossiyskoy sotsiologii [The development of Internet technologies — a challenge to modern Russian sociology]. Moscow: IS RAS. Available at: http://www.isras.ru/index.php?page_id=957 (accessed April 27, 2015).
36. Davydov, A. A. 2009. Twine: Iskusstvennyy intellekt sozdaet sotsial'nye vzaimodeystviya [Twine — artificial intelligence creates social interaction]. Moscow: IS RAS. Available at: http://www.isras.ru/index.php?page_id=974 (accessed April 27, 2015).
37. Kolesnikov, A. V. 2015. Printsipy i metodologiya razrabotki informatsionnykh heterogennykh sistem dvunapravlennoy gibrizatsii [Approach and methodology of the development of informational heterogeneous systems of bidirectional hybridization]. *6th Research and Practice Conference (International) "Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence" Proceedings*. Moscow: Fizmatlit. 1:36–53.
38. Krupica, V. V. 2003. Lichnost'. Kollektiv. Stil' otnosheniy [Personality. Collective. Style of relation]. N. Novgorod: VGIPA. 385 p.
39. Lenat, D. 1975. BEINGS: Knowledge as interacting experts. *IJCAI-75: 4th Joint Conference (International) on Artificial Intelligence Proceedings*. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers. 126–133.
40. Hewitt, C. 1977. Viewing control structures as patterns of message passing. *Artificial Intelligence* 8(3):323–364.
41. Erman, L., F. Hayes-Roth, Lesser V., and D. Reddy. 1980. The HEARSAY-2 speech understanding system: Integrating knowledge to resolve uncertainty. *ACM Computers Surveys* 12(2):213–253.
42. Gorodeckij, V. I. 1998. Mnogoagentnye sistemy: Osnovnye svoystva i modeli koordinatsii povedeniya [Multiagent systems: Main properties and models of the behavior coordination]. *Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nye sistemy* [Information Technology and Computing Systems] 1:22–34.
43. Horoshevskij, V. F. 1999. Povedenie intellektual'nykh agentov: Modeli i metody realizatsii [The behavior of intelligent agents: Models and methods of implementation]. *4th Workshop (International) on Applied Semiotics, Semiotics and Intelligent Management Proceedings*. Pereslav'-Zaleskiy: RAAI. 5–20.
44. Kolesnikov, A. V. 2013. Geterogennye estestvennye i iskusstvennye sistemy [Natural and artificial heterogeneous systems]. *7th Research and Practice Conference "Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence" Proceedings*. Moscow: Fizmatlit. 1:86–103.
45. Kolesnikov, A. V., and I. A. Kirikov. 2007. Metodologiya i tekhnologiya resheniya slozhnykh zadach metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh sistem [Methodology and technology for solving of complex problems using the methodology of functional hybrid artificial systems]. Moscow: IPI RAN. 387 p.

46. Patriarkh Moskovskii i vseya Rusi Kirill, ed. [Ed. Patriarch of Moscow and All Russia Kirill]. 2000. Pravoslavnaya entsiklopediya [Russian Orthodox Church encyclopedia]. Moscow: Orthodox encyclopedia. 1:77–78.
47. Zagorul'ko, Ju. A., and G. B. Zagorul'ko. Ispol'zovanie ontologiy v ekspertnykh sistemakh i sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy [Using of ontologies in expert systems and decision support systems]. Available at: <http://www.myshared.ru/slide/92940/> (accessed May 20, 2015).
48. Kobrinskij, B. A. 2012. Obraznye predstavleniya spetsialista i problema ikh otrazheniya v intellektual'nykh sistemakh [Experts metaphors and the problem of its reflection in intellectual systems]. *2nd Research and Practice Conference (International) “Open Semantic Technologies for Intelligent Systems” Proceedings*. Minsk: BGUR. 53–62.
49. Pospelov, D. A., ed. 1990. Iskusstvennyy intellekt. V 3-kh kn. Kn. 2: Modeli i metody: Spravochnik. [Artificial intelligence in 3 vols. Vol. 2: Models and methods: Handbook]. Moscow: Radio and Signal. 304 p.
50. Sibbet, D. 2010. Visual meetings: How graphics, sticky notes and idea mapping can transform group productivity. New York, NY: Wiley. 288 p.
51. Ortiz, C. A., and M. R. Park. 2011. Visual controls: Applying visual management to the factory. New York, NY: CRC Press. 180 p.
52. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, and S. B. Rumovskaya. 2013. Issledovanie slozhnoy zadachi diagnostiki arterial'noy gipertenzii v metodologii iskusstvennykh heterogenykh sistem [Research of the complex problem at diagnosing of the arterial hypertension within the methodology of artificial heterogeneous systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki—Systems and Means of Informatics* 23(2):96–114. doi: 10.14357/08696527130208.
53. Kolesnikov, A. V., and S. A. Soldatov. 2011. Modelirovaniye kollektivnogo intellekta, reshayushchego slozhnyu zadachu planirovaniya na mashinostroitel'nym predpriyatiyem [Modeling of collective intelligence solving complex planning task at machine-building enterprise]. *V mire nauchnykh otkrytiy* [In the world of science researches]. Ser. Mathematics. Mechanics. Informatics. 12:172–181.
54. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, and S. V. Listopad. 2014. Gibridnye intellektual'nye sistemy s samoorganizatsiyey: Koordinatsiya, soglasovannost', spor [Hybrid artificial systems with self-organization: Coordination, conformance, row]. Moscow: IPI RAN. 189 p.

Received August 19, 2015

Contributors

Kirikov Igor A. (b. 1955) — Candidate of Science (PhD) in technology; director, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; baltbipiran@mail.ru

Kolesnikov Alexander V. (b. 1948) — Doctor of Science in technology; professor, Department of Telecommunications, Immanuel Kant Russian State University, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 Nevskogo Str., Kaliningrad

236041, Russian Federation; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; avkolesnikov@yandex.ru

Listopad Sergey V. (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in technology; scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; ser-list-post@yandex.ru

Rumovskaya Sophiya B. (b. 1985) — programmer I, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; sophiyabr@gmail.com

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ДОСТАВКОЙ СЕТЕВЫХ ПАКЕТОВ НА СТОРОНЕ ПОЛУЧАТЕЛЯ*

B. H. Гридин¹, E. O. Карпухин¹, И. А. Евдокимов¹

Аннотация: Приведены результаты имитационного моделирования алгоритма управления перегрузкой на основе окна получателя. Применение данного алгоритма позволяет втрое сократить потери пакетов в сети. Уменьшение среднего размера окна получателя в 2,5 раза снижает вероятность успешного проведения атаки класса hijacking. Данный способ находит применение в локальных и городских сетях, ограниченных временем передачи пакета до получателя и обратно 3–5 мс.

Ключевые слова: окно получателя; управление перегрузкой в сетях; информационное взаимодействие; оптимизация протоколов; hijacking

DOI: 10.14357/08696527150309

1 Введение

Управление перегрузкой, т. е. интенсивностью передачи пакетов по сети, может осуществляться не только на стороне отправителя, но и на стороне получателя [1]. Во втором случае возможна более точная оценка характеристик канала передачи данных (пропускной способности, потерь пакетов, времени доставки пакета), так как каналы «от абонента» и «к абоненту» могут сильно отличаться по свойствам друг от друга. Для получения более точной оценки характеристик канала передачи данных следует использовать опцию «временные метки» с подсчетом минимальной величины RTT (времени передачи до получателя и обратно) на интервале времени, соразмерном с данной величиной [2].

Особенностью управления перегрузкой на стороне получателя является динамическое изменение окна получателя для ограничения интенсивности передачи данных на стороне отправителя, так как размер скользящего окна *window*, характеризующий скорость отправки сетевых пакетов, определяется исходя из минимального значения либо окна перегрузок (CWND), либо окна получателя (RWIN), т. е. $window = \min(CWND, RWIN)$. Рассматриваемый в дан-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-07-31247 мол-а).

¹ Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук,
info@ditc.ras.ru

ной статье способ управления доставкой сетевых пакетов относится к методам параметрической оптимизации протоколов путем динамического изменения окна получателя [3], что гарантирует его совместимость с существующими стандартами на протоколы информационного взаимодействия.

Для оценки эффективности данного способа была создана специализированная программная модель, позволяющая исследовать особенности функционирования алгоритмов управления перегрузкой. Рассмотрим ее основные возможности перед тем, как перейти к результатам моделирования.

2 Специализированная программная модель для исследования эффективности алгоритмов управления перегрузкой

Существующие средства моделирования протоколов, использующих алгоритмы управления перегрузкой, не позволяют динамически управлять окном получателя. Поэтому была разработана программа в виде среды моделирования алгоритмов управления перегрузкой (рис. 1).



Рис. 1 Внешний вид среды моделирования алгоритмов управления перегрузкой при исследовании способа управления доставкой пакетов на стороне получателя (Dynamic window)

Данная среда позволяет оценить эффективность процесса передачи данных, измеряя текущий размер скользящего окна и отображая его на графике. При завершении моделирования выводится информация о количестве потерянных пакетов, среднем размере скользящего окна. Последняя характеристика позволяет оценить вероятность успешной реализации атак класса hijacking, а также среднюю скорость передачи данных.

Основные параметры, которые можно менять в данной модели:

1. **Число пакетов для отправки.** Чем больше пакетов будет отправлено за один цикл моделирования, тем выше точность результата. Однако стоит отметить, что при этом существенно увеличивается длительность моделирования, особенно в случае использования многопользовательского режима. Поэтому выбран компромисс между длительностью и точностью моделирования, заключающийся в передаче 10 000 пакетов от отправителя (клиента) к получателю (серверу).
2. **Режим работы.** Основной режим работы модели — однопотоковая передача данных от клиента к серверу. Однако в реальных сетях одновременно существует множество соединений между абонентами, поэтому для моделирования этого случая предназначен многопользовательский режим. Данный режим позволяет исследовать влияние множества короткоживущих (меньше длительности работы основного потока) и долгоживущих (больше длительности работы основного потока) потоков на работу основного потока.
3. **Случайная задержка.** Для моделирования процесса передачи пакета получателю и обратно необходимо внести задержку. Ее можно задать в определенном диапазоне (минимальное и максимальное значение). Для каждого пакета будет добавлена индивидуальная задержка из данного диапазона.
4. **Размер пакета.** В сетях с разной топологией и технологией доступа к среде передачи применяются разные длины пакетов. Наиболее распространены сети, использующие технологию Ethernet, поэтому размер пакета установим равным 1480 байт.
5. **Буфер узкого места.** Сетевые устройства, такие как маршрутизаторы и коммутаторы, обладают буфером для хранения поступающих к ним пакетов, так как одновременно на один интерфейс может быть передан только один пакет. Особый интерес представляют те сетевые устройства, которые по ряду причин не могут быстро обработать все пакеты от одной группы абонентов и передать их другой, поэтому они вынуждены помещать большое число пакетов в очередь. В этом случае можно говорить о наличии в сети узкого места, которым является данное устройство. Размер буфера маршрутизатора, как правило, составляет не менее 100 Кбайт на один порт [4], поэтому выберем данное значение для дальнейшего использования в рассматриваемой модели.
6. **Алгоритм управления перегрузкой.** В разработанной среде можно выбрать 2 алгоритма управления перегрузкой — стандартный Reno, используемый по

умолчанию в большинстве протоколов транспортного уровня (TCP, SCTP), а также исследуемый алгоритм, заключающийся в управлении перегрузкой на стороне получателя при помощи окна получателя (Dynamic window).

7. **Шаг моделирования.** Он важен для корректной блокировки программных потоков сервера, клиента и маршрутизатора (узкого места) разработанной программной модели. Результаты отладки модели показали, что оптимальным значением данного параметра является 100 мс, но для менее производительных компьютеров этот параметр может быть увеличен в несколько раз.

Программная модель состоит из клиента (отправителя сетевых пакетов), сервера (получателя), а также маршрутизатора (узкого места), на котором реализована дисциплина обслуживания RED (random early detection), предотвращающая возникновение самоподобного трафика. Ниже будут представлены результаты исследования эффективности алгоритма управления перегрузкой Dynamic window в сравнении с Reno для различных конфигураций сети на основе выбранных выше значений параметров модели.

3 Оценка эффективности способа управления доставкой пакетов на стороне получателя при использовании одного соединения

Рассмотрим случай передачи данных от отправителя к получателю с использованием одного соединения (потока данных). Размер скользящего окна в силу особенностей работы стандартного алгоритма Reno уменьшается под воздействием потерь пакетов. При управлении доставкой пакетов на стороне получателя в качестве основного алгоритма на стороне отправителя будет использоваться тот же самый Reno, но учитывающий размер окна получателя и ограничивающий скорость передачи данных в соответствии со значением этого окна.

В программной модели будем менять следующие параметры:

- случайную задержку (от 1 до 50 мс);
- режим работы (сначала моделируем алгоритм Reno, а затем исследуем Dynamic window).

Результаты исследований двух алгоритмов в зависимости от значения RTT приведены на рис. 2 и 3. В первом случае (см. рис. 2) представлен график зависимости размера скользящего окна (окна получателя для алгоритма Dynamic window) при изменении случайной задержки. Выигрыш второго алгоритма перед первым в части размера скользящего окна на небольших (до 3 мс) значениях RTT объясняется тем, что число потерянных пакетов при использовании алгоритма Dynamic window существенно (в 3–4 раза) меньше, чем у Reno. Такие маленькие потери объясняются высокой точностью оценки окна получателя, не превышающей некоторого порогового значения, при котором происходит перегрузка узкого места (переполнение буфера маршрутизатора) и, как следствие, потеря пакета

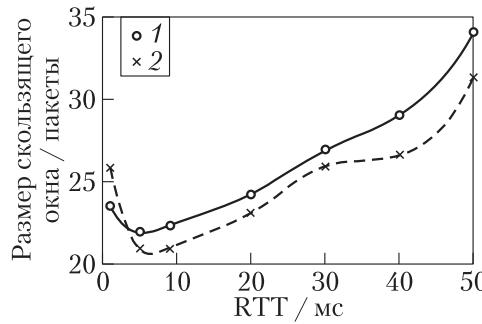


Рис. 2 График зависимости среднего размера скользящего окна от величины RTT для алгоритмов управления перегрузкой Reno (1) и Dynamic window (2)

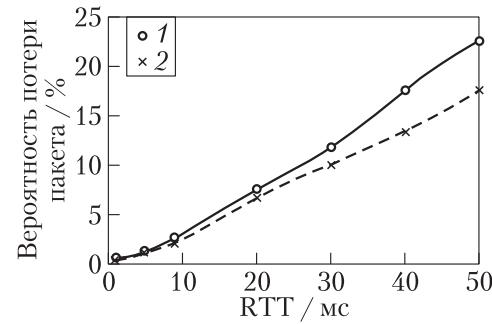


Рис. 3 Влияние величины RTT на вероятность потери пакета для алгоритмов управления перегрузкой Reno (1) и Dynamic window (2)

с уменьшением размера скользящего окна в 2 раза. Использование алгоритма Reno приводит к постоянной перегрузке узкого места, и поэтому средний размер скользящего окна получается меньше. Однако с ростом величины RTT средний размер окна у второго алгоритма уменьшается по сравнению с первым, несмотря на то что разница между Reno и Dynamic window в части потерь пакетов составляет 1,5 раза в пользу второго (см. рис. 3). Это связано с ухудшением точности оценки окна получателя, которая приводит к его уменьшению.

Оценим вероятность реализации атак класса hijacking при использовании алгоритмов Reno и Dynamic window на основе формулы [5]

$$P_a = \frac{\text{RWIN} \cdot t_{\text{пред}} k}{\text{window} \cdot S}, \quad (1)$$

где P_a — вероятность реализации атаки класса hijacking; $t_{\text{пред}}$ — длительность передачи 10 000 пакетов; k — число пакетов, отправленных злоумышленником за 1 с, S — максимально возможное значение идентификатора пакета.

Сравним эффективность защиты процесса передачи данных при использовании алгоритма Dynamic window по сравнению с Reno. Для этого обозначим переменной η отношение вероятностей атаки в первом и во втором случае:

$$\eta = \frac{P_{a,DW}}{P_{a,R}}, \quad (2)$$

где $P_{a,DW}$ — вероятность атаки при использовании алгоритма Dynamic window, а $P_{a,R}$ — вероятность атаки при использовании алгоритма Reno. Подставив $P_{a,DW}$ и $P_{a,R}$ в (2) с учетом (1), получим выражение

$$\eta = \frac{\text{RWIN}_{\text{DW}} t_{\text{пред,DW}} k / (\text{window}_{\text{DW}} S)}{\text{RWIN}_R t_{\text{пред,R}} k / (\text{window}_R S)} = \frac{\text{RWIN}_{\text{DW}} t_{\text{пред,DW}} \text{window}_R}{\text{RWIN}_R t_{\text{пред,R}} \text{window}_{\text{DW}}}, \quad (3)$$

где индексом DW помечены переменные, относящиеся к алгоритму Dynamic window, а индексом R — к Reno. Учтем, что в случае управления доставкой на стороне получателя размер окна получателя будет близок к величине скользящего окна. В случае использования алгоритма Reno окно получателя должно превышать размер скользящего окна не менее чем в 2 раза, в противном случае рост окна перегрузок CWND будет ограничиваться окном получателя, что не позволит в полной мере использовать потенциал данного алгоритма. Исходя из этих логических посылок, подставим в выражение (3) значение окна получателя для первого и второго алгоритма и получим

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{t_{\text{пред,DW}} \text{window}_R}{t_{\text{пред,R}} \text{window}_{\text{DW}}}. \quad (4)$$

Чем меньше будет значение переменной η при $\eta < 1$, тем большую защищенность будет показывать способ управления доставкой сетевых пакетов на стороне получателя по сравнению с Reno. График зависимости соотношения вероятностей атак η от величины RTT, для которой были выбраны значения скользящих окон и времени передачи с использованием каждого из алгоритмов, приведен на рис. 4.

По графику видно, что эффективность защиты от атак класса hijacking в случае применения способа управления Dynamic window при значениях RTT, меньших 3 мс, выше, чем у алгоритма Reno, в 2,5 раза. При остальных значениях RTT защищенность соединения оказывается лучше примерно в 2 раза, что связано с одинаковой эффективной скоростью передачи данных при использовании рассматриваемых алгоритмов управления перегрузкой.

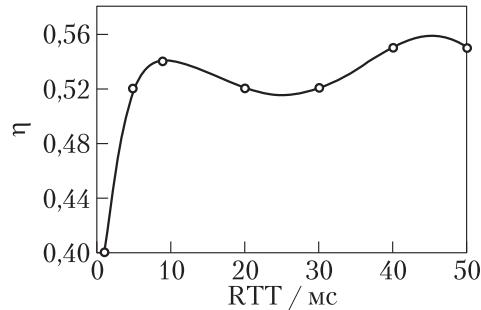


Рис. 4 Зависимость соотношения вероятностей атак от величины RTT для рассмотренных алгоритмов

4 Оценка эффективности способа управления доставкой пакетов на стороне получателя при использовании нескольких соединений

Перейдем к рассмотрению эффективности управления доставкой сетевых пакетов на стороне получателя с учетом многопользовательской среды, в которой существует множество информационных потоков, использующих соединения.

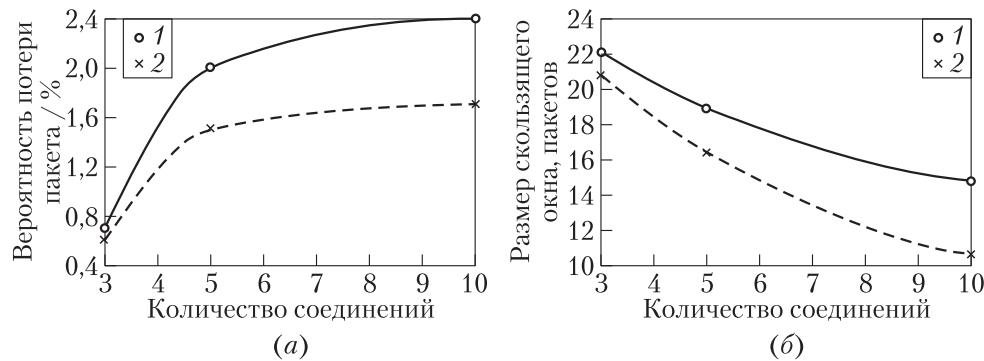


Рис. 5 Влияние количества короткоживущих соединений на вероятность потери пакета в исследуемом соединении (а) и на средний размер скользящего окна исследуемого соединения (б): 1 — алгоритм управления перегрузкой Reno; 2 — алгоритм управления перегрузкой с использованием окна получателя

Так как исследуемый способ доставки показал эффективность при небольших величинах RTT, проведем моделирование процесса передачи данных для двух алгоритмов управления перегрузкой — Reno и Dynamic window — при случайной задержке от 1 до 3 мс.

Начнем исследование с короткоживущих соединений. Для моделирования были выбраны от 3 до 10 короткоживущих соединений и построена зависимость размера скользящего окна и потерь пакетов от количества соединений (рис. 5).

По графикам видно, что с ростом числа соединений происходит уменьшение размера скользящего окна и увеличение вероятности потери пакетов. При этом темп изменения размера окна и вероятности потери пакетов с увеличением количества соединений уменьшается, что связано с незначительным увеличением вероятности появления трех и более соединений в один и тот же момент времени, приводящих к перераспределению нагрузки в узком месте и уменьшению скорости передачи данных.

Также по графикам можно сделать вывод о том, что способ управления доставкой пакетов на стороне получателя позволяет лучше адаптировать интенсивность потока пакетов под характеристики канала, что проявляется в меньшем проценте потерь пакетов, однако размер скользящего окна оказывается на 5%–30% меньше, чем у Reno.

Рассмотрим также влияние долгоживущих соединений, которые оказывают постоянное воздействие на исследуемое соединение. Результаты для 3–10 соединений приведены на рис. 6 и 7.

Долгоживущие соединения оказывают постоянное и существенное влияние на исследуемое соединение, поэтому результаты по потерям пакетов получаются в 3–10 раз хуже короткоживущих, а размер скользящего окна находится на

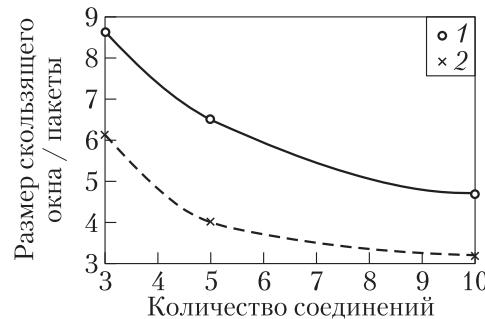


Рис. 6 Влияние количества долгоживущих соединений на средний размер скользящего окна исследуемого соединения: 1 — алгоритм управления перегрузкой Reno; 2 — алгоритм управления перегрузкой с использованием окна получателя

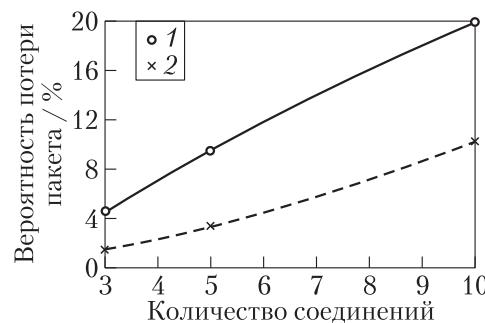


Рис. 7 Зависимость вероятности потери пакета в исследуемом соединении от количества долгоживущих соединений: 1 — алгоритм управления перегрузкой Reno; 2 — алгоритм управления перегрузкой с использованием окна получателя

уровне, близком к минимальному (1–2 пакета). Однако и в этом случае алгоритм управления перегрузкой Dynamic window лучше подстраивается под постоянно меняющиеся условия (длину очереди, задержки) в узком месте моделируемой сети.

Для сравнения в таблице приведены результаты моделирования 10 потоков, 7 из которых являются короткоживущими, а 3 — долгоживущими, что наиболее адекватно отображает распределение трафика в существующих сетях [6].

Из таблицы видно, что по всем трем позициям алгоритм Dynamic window выигрывает у стандартного Reno. Это объясняется тем, что короткоживущие соединения оказывают влияние на все долгоживущие, в том числе и на исследуемое, приводя к резкому уменьшению размера окна во всех соединениях. В наибольшей степени исследуемое соединение выигрывает от влияния короткоживущих соеди-

Результаты моделирования процесса передачи данных при использовании 7 краткоживущих и 3 долгоживущих соединений для двух алгоритмов управления перегрузкой

Алгоритм управления перегрузкой	Время передачи 10 000 пакетов, мс	Количество потерянных пакетов	Средний размер скользящего окна
Reno	4807	1019	7,1
Dynamic window	3994	430	8,0

нений в случае использования алгоритма Dynamic window, так как соединение быстрее подстраивается под изменяющиеся условия в узком месте.

5 Заключение

По представленным в данной статье результатам моделирования двух алгоритмов управления перегрузкой Reno и Dynamic window видно, что управление доставкой сетевых пакетов на стороне получателя позволяет гибче подстраивать процесс передачи данных под загруженность узкого места сети. К тому же предлагаемый способ обеспечивает уменьшение в 2–2,5 раза вероятности атак класса hijacking, представляющих серьезную опасность для функционирования сетей из-за доступности программного обеспечения, реализующего генерацию пакетов с деструктивными данными.

Дальнейшее направление исследований связано с совершенствованием алгоритма управления Dynamic window для сетей с большими величинами RTT. Необходимо также дополнить данный способ управления доставкой пакетов на стороне получателя механизмами обнаружения случайных потерь пакетов, возникающих при воздействии помех на физическом и канальном уровне.

Литература

1. Карпухин Е. О., Гасанов Э. О., Соловьев В. И. Способ управления доставкой сетевых пакетов на стороне получателя для повышения эффективности информационного взаимодействия в телекоммуникационных системах // Системы высокой доступности, 2014. Т. 10. № 2. С. 33–37.
2. Карпухин Е. О., Гасанов Э. О., Таракова О. Б., Николаев Д. А. Анализ способов оценки загруженности сети для управления окном получателя // Информационные технологии и вычислительные системы, 2014. № 3. С. 35–38.
3. Карпухин Е. О., Сееднов А. С., Смирнов С. Н. Применение методов оптимизации протоколов в современных информационно-телекоммуникационных системах // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2011. Т. 9. № 8. С. 44–48.
4. Router/switch buffer size issues. <http://people.ucsc.edu/~warner/buffer.html>.

5. Карпухин Е. О. Выбор оптимального размера окна получателя в телекоммуникационных системах, использующих протокол TCP // Известия Института инженерной физики, 2011. № 4. С. 25–27.
6. Анализ WWW-трафика. <http://citforum.ru/nets/tcp/uskorinet>.

Поступила в редакцию 11.03.15

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF METHOD FOR CONTROLLING THE DELIVERY OF NETWORK PACKETS ON RECEIVER

V. N. Gridin, E. O. Karpukhin, and I. A. Evdokimov

Design Information Technologies Center, Russian Academy of Sciences, 7a Marshal Biryuzov Str., Odintsovo 143000, Moscow Region, Russian Federation

Abstract: This article contains the results of the simulation congestion control algorithm based on receiver window. Use of this algorithm makes it possible to reduce packet loss in network up to 3 times. Decrease of average size of receive window reduces the likelihood of a successful hijack attack up to 2.5 times. This method is recommended for local and metropolitan area networks, the limited round trip time is 3–5 ms.

Keywords: receive window; congestion control; data-driven interaction; protocol optimization; hijacking

DOI: 10.14357/08696527150309

Acknowledgments

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 14-07-31247 mol_a).

References

1. Karpukhin, E. O., E. O. Gasanov, and V. I. Solodovnikov. 2014. Sposob upravleniya dostavkoj setevykh paketov na storone poluchatelya dlya povysheniya effektivnosti informatsionnogo vzaimodeystviya v telekommunikatsionnykh sistemakh [Method of controlling the delivery network packets at the receiver to improve the efficiency of data-driven interaction in telecommunication systems]. *Sistemy Vysokoy Dostupnosti* [High-Availability Systems] 2:33–37.
2. Karpukhin, E. O., E. O. Gasanov, O. B. Tarasova, and D. A. Nikolaev. 2014. Analiz sposobov otsenki zagruzennosti seti dlya upravleniya oknom poluchatelya [Analysis of evaluation methods of network congestion to control receive window]. *Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nye Sistemy* [Information Technology and Computer Systems] 3:35–38.

3. Karpukhin, E. O., A. S. Seednov, and S. N. Smirnov. 2011. Primenenie metodov optimizatsii protokolov v sovremennoykh informatsionno-telekommunikatsionnykh sistemakh [Utilization methods of optimization protocols in modern information and telecommunication systems]. *Informatsionno-Izmeritel'nye i Upravlyayushchie Sistemy* [Information-Measuring and Operating Systems] 8:44–48.
4. Router/switch buffer size issues. Available at: <http://people.ucsc.edu/~warner/buffer.html> (accessed November 24, 2014).
5. Karpukhin, E. O. 2011. Vybor optimal'nogo razmerra okna poluchatelya v telekommunikatsionnykh sistemakh, ispol'zuyushchikh protokol TCP [Selection of optimal size of receiver window in telecommunication systems using TCP]. *Izvestiya Instituta Inzhernoy Fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics] 4:25–27.
6. Analiz WWW-trafika [Analysis of WWW-traffic]. Available at: <http://citforum.ru/nets/tcp/uskorinet/> (accessed November 25, 2014).

Received March 11, 2015

Contributors

Gridin Vladimir N. (b. 1944) — Doctor of Science in technology, professor, scientific leader, Design Information Technologies Center, Russian Academy of Sciences, 7a Marshal Biryuzov Str., Odintsovo 143000, Moscow Region, Russian Federation; info@ditc.ras.ru

Karpukhin Eugene O. (b. 1987) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Design Information Technologies Center, Russian Academy of Sciences, 7a Marshal Biryuzov Str., Odintsovo 143000, Moscow Region, Russian Federation; info@ditc.ras.ru

Evdokimov Ivan A. (b. 1985) — junior scientist, Design Information Technologies Center, Russian Academy of Sciences, 7a Marshal Biryuzov Str., Odintsovo 143000, Moscow Region, Russian Federation; info@ditc.ras.ru

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

А. А. Зацаринный¹, Ю. С. Ионенков²

Аннотация: Данная статья продолжает цикл статей, посвященных вопросам оценки эффективности сложных систем. Рассмотрен вопрос оценки эффективности автоматизированных систем (АС) с применением метода анализа иерархий. Представлены основные особенности и преимущества данного метода. Разработана методика оценки эффективности АС с применением метода анализа иерархий. Суть методики заключается в представлении задачи в виде иерархической структуры с несколькими уровнями, в данном случае с тремя. Предложены показатели эффективности на каждом из уровней критерии оценки эффективности АС. Изложены основные этапы расчета по данной методике. Представлены формулы для расчета частных и обобщенных показателей эффективности. Даны предложения по качественной (лингвистической) оценке полученного результата путем сопоставления аналитической оценки с нормированной фундаментальной шкалой. Приведен пример применения методики для оценки эффективности системы распределенных ситуационных центров органов государственной власти (СРСЦ) применительно к текущему и к планируемому уровню ее развития.

Ключевые слова: автоматизированная система; эффективность; показатель; критерий; альтернатива; своевременность; достоверность; полнота информации; иерархия; ситуационный центр

DOI: 10.14357/08696527150310

1 Введение

Под эффективностью АС понимается степень достижения целей, поставленных при ее создании [1].

Для количественной оценки эффективности вводится критерий эффективности. Критерий эффективности системы (изделия) определяют на множестве показателей. Под показателем понимается характеристика, позволяющая количественно оценить свойство этой системы с какой-либо одной стороны.

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

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, uionenkov@ipiran.ru

Оценку эффективности АС проводят при решении следующих основных задач:

- формирование требований, предъявляемых к создаваемой системе;
- анализ системотехнического облика системы на соответствие заданным требованиям при ее разработке и формировании наиболее целесообразного варианта построения системы;
- анализ действующих систем на стадиях опытной и постоянной эксплуатации.

При проведении оценки эффективности АС задают универсальную систему обобщенных показателей, таких как оперативность (своевременность), устойчивость, достоверность и др. Указанная система показателей, с одной стороны, должна быть достаточной для оценки эффективности системы с необходимой точностью и, с другой стороны, должна производить эту оценку с наибольшей простотой.

Существует два важнейших аспекта методологического подхода к оценке эффективности — это однокритериальная и многокритериальная оценка [2, 3].

Однокритериальная оценка эффективности используется при наличии у системы главенствующей характеристики. Однако подобный подход приводит к удовлетворительным результатам только в некоторых отдельных случаях, когда одна из систем по большинству показателей лучше другой.

В связи с этим возникает потребность в обобщенной оценке системы в виде одной численной величины, полностью характеризующей ее эффективность, и, в первую очередь, в создании корректной методики вычисления комплексного показателя эффективности системы. Основную сложность при определении данного интегрального критерия представляет ранжирование частных показателей.

Целью данной статьи является рассмотрение методического подхода к оценке эффективности АС с использованием метода анализа иерархий. Предложена методика оценки эффективности и пример оценки применительно к системе ситуационных центров.

2 Общий подход к оценке эффективности автоматизированной системы на основе метода анализа иерархий

В статьях [4–7] рассмотрены методические вопросы оценки эффективности ситуационных центров на основе их структурно-функционального представления. При этом использован принцип комплексности оценки, заключающийся в том, что эффективность функционирования ситуационного центра определяется показателями эффективности его компонентов: функционального, технологического, технического, эксплуатационного и организационного. Представлена методика сравнительного анализа эффективности ситуационных центров.

Вместе с тем опыт применения указанной методики для оценки эффективности сложных АС, включающих ряд однотипных элементов (ситуационных центров),

показал, что она обладает рядом недостатков, таких как субъективность мнений экспертов при выборе весовых коэффициентов; неявная взаимная компенсация показателей; использование постоянных весовых коэффициентов, не зависящих от значения показателей.

В настоящей статье предлагается методика, позволяющая, на взгляд авторов, избежать отмеченных недостатков.

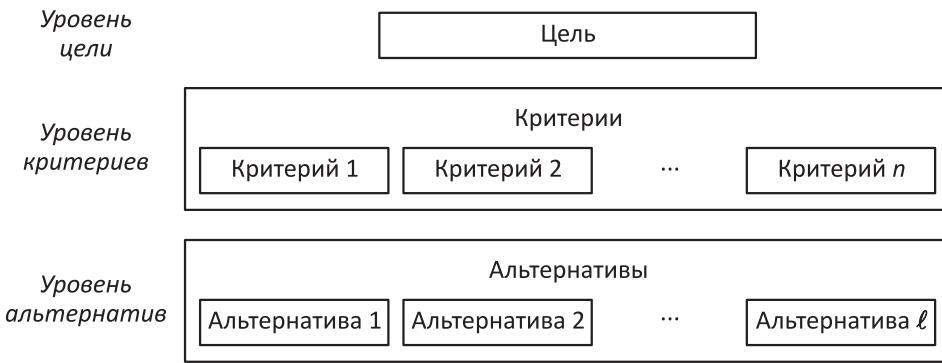
Достаточно эффективным методом количественного оценивания сложных проблем является метод анализа иерархий, предложенный американским ученым Т. Саати [8–10]. Суть его состоит в декомпозиции исходной многокритериальной проблемы на локальные составляющие, проведении по специальной форме экспертного опроса лиц, принимающих решения, и дальнейшей математической обработке их суждений.

Метод анализа иерархий обладает следующими особенностями:

- (1) дает возможность получения количественной оценки факторов изучаемого процесса, позволяя установить приоритеты этих факторов. Показатели процесса имеют разную природу и могут быть измерены по разным шкалам, поэтому простое сложение их значений невозможно;
- (2) позволяет обосновать решения в условиях неопределенности исходной информации, возникающей ввиду неполноты сведений экспертов, сомнений принимающего решение лица;
- (3) оказывается эффективным при решении многокритериальных задач, когда необходимо определить значимость большого числа факторов.

Суть метода заключается в представлении задачи в виде иерархической структуры с несколькими уровнями. Верхний уровень иерархии представляет собой цель исследования, решение проблемы выбора. На следующем уровне иерархии расположены компоненты, которые представляют собой составляющие цели. Каждый следующий уровень позволяет декомпозировать элементы предыдущего уровня, предлагая тем самым внутреннее строение каждого компонента предыдущего уровня иерархии. В случае решения проблемы выбора на последнем уровне размещаются непосредственно альтернативы, используемые в процессе выбора. При этом каждая составляющая процесса характеризуется двумя параметрами: важностью и степенью выраженности. Иерархическая структура процесса представлена на рис. 1.

После того как иерархическая структура построена, происходит постепенный спуск от самого верхнего уровня иерархии до самого нижнего. На каждом шаге происходит оценка вклада каждого компонента нижнего уровня на компоненты более высокого уровня. В результате элементы нижних уровней последовательно получают численное взвешивание относительно исходной цели. При этом важно, чтобы на каждом шаге сумма значений влияния компонент была равна единице, что достигается своевременным нормированием слагаемых. Таким образом, метод анализа иерархий в своей основе использует метод численного взвешивания. Определение весов вхождения элементов нижней иерархии в предыдущую

**Рис. 1** Иерархическая структура процесса

производится на основании экспертного оценивания методом попарного сравнения. В качестве основы для такого сравнения предназначена шкала нечетких определений сравнений [10], представленная в табл. 1.

Выбор такой шкалы обусловливается следующими причинами:

- психологические возможности человека — возможность достаточно четко отличать 7 ± 2 степени сравнения;
- высокая степень точности оценки предметных областей (имеющих известное устройство).

Таблица 1 Шкала сравнений в методе анализа иерархий

Степень важности	Количественное значение	Обоснование
Однаковая значимость	1	Два действия вносят одинаковый вклад в достижение цели
Умеренное превосходство	3	Опыт и суждение дают легкое предпочтение одному действию перед другим
Сильное превосходство	5	Опыт и суждение дают сильное предпочтение одному действию перед другим
Значительное (большое) превосходство	7	Предпочтение одного действия перед другим очень сильно
Абсолютное превосходство	9	Одно действие в высшей степени предпочтительно другому
Промежуточные значения	2, 4, 6, 8	Степень сравнения находится между основными (нечетными) степенями

Таблица 2 Матрица сравнений для критериев

Критерий	1	2	...	n	Собственный вектор	Вес критерия
1	1	a_1^2	...	a_1^n	W_1	w_1
2	a_2^1	1	...	a_2^n	W_2	w_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
n	a_n^1	a_n^2	...	1	W_n	w_n

Замечание: a_j^i — значение i -го критерия при оптимизации по j -му критерию.

Таблица 3 Матрица сравнений альтернатив по критерию 1 ($2, \dots, n$)

Альтернатива	1	2	...	l	Собственный вектор	Вес альтернативы по соответствующему критерию
1	1	a_l^2	...	a_l^l	W_1	V_{11}
2	a_2^1	1	...	d_2^l	W_2	V_{21}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
l	a_l^1	a_l^2	...	1	W_l	V_{l1}

Замечание: a_j^i — важность альтернативы i относительно альтернативы j по соответствующему критерию.

Заполнение сравнительных матриц происходит следующим образом: на основании степени сравнения p объектов i и j из допустимых значений в таблицу сравнения помещается: $a_{ij} = p$ и $a_{ji} = 1/p$. При этом $\forall i a_{ii} = 1$.

После того как матрица заполнена, необходимо найти собственный вектор этой матрицы, соответствующий максимальному собственному значению. Нормированные компоненты этого вектора и будут равны вкладам компонентов нижнего уровня в верхний. Вид матриц сравнений для критериев и альтернатив представлен в табл. 2 и 3 соответственно.

Приведенные таблицы позволяют рассчитать коэффициенты важности соответствующих элементов иерархического уровня. Для этого нужно вычислить собственные векторы матриц, а затем пронормировать их. Для вычисления собственных векторов извлекается корень n -й степени (n — размерность матрицы) из произведений элементов каждой строки. Далее производится нормирование критериев:

$$w_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \quad (1)$$

где w_i — вес критерия; W_i — собственный вектор; N — число критериев.

Синтез полученных коэффициентов важности и определение показателя качества соответствующей альтернативы осуществляется по формуле:

$$V_j = \sum_{i=1}^N w_i V_{ij}, \quad (2)$$

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

Для оценки степени согласованности экспертов используется следующий алгоритм подсчета [11]:

Таблица 4 Значения случайного индекса согласованности [9]

n	R
2	0
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51
12	1,54
13	1,56
14	1,57
15	1,58

1. В матрице парных сравнений суммируются элементы каждого столбца.
2. Сумма элементов каждого столбца умножается на соответствующие нормализованные компоненты вектора весов, определенного из той же матрицы.
3. Полученные числа суммируются, значение суммы определяется как λ_{\max} .
4. Находится индекс согласованности:

$$L = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (3)$$

где n — размер матрицы.

5. Выбирается среднее значение индекса согласованности R для матриц, заполненных случайным образом (табл. 4).
6. Вычисляется отношение согласованности $T = L/R$. Если величина $T \leq 0,1$, то степень согласованности экспертных данных считается приемлемой [11].

Главной положительной стороной метода анализа иерархий является его системность, позволяющая в максимальной степени учесть все влияющие на проблему выбора факторы. Благодаря этому удается наиболее естественным и четким образом устранить большинство вопросов, возникающих при реализации численно-взвешенного метода, который используется в качестве основы в методе анализа иерархий.

3 Применение метода анализа иерархий к оценке эффективности автоматизированной системы

В рамках изложенного выше подхода для проведения оценки эффективности АС разработана следующая методика с применением метода анализа иерархий.

Этап 1. Моделирование процесса и математическая постановка задачи. На этом шаге осуществляется построение трехуровневой иерархической структуры:

- (1) уровень цели — оценка эффективности АС;
- (2) первый уровень критериев: своевременность; полнота; достоверность; безопасность; организация и т. д.;
- (3) второй уровень критериев — показатели по каждой группе критериев первого уровня. В качестве таких показателей по отдельным группам могут быть использованы: время доведения информации; доля информации, представленной в требуемом объеме; коэффициент готовности; вероятность безошибочной обработки информации; вероятность несанкционированного доступа к системе; укомплектованность подразделений эксплуатации штатными специалистами; степень реализации эргономических требований и т. д.

Перечень критериев 1-го и 2-го уровней определяется применительно к конкретным типам АС.

Общий вид иерархической структуры представлен на рис. 2.

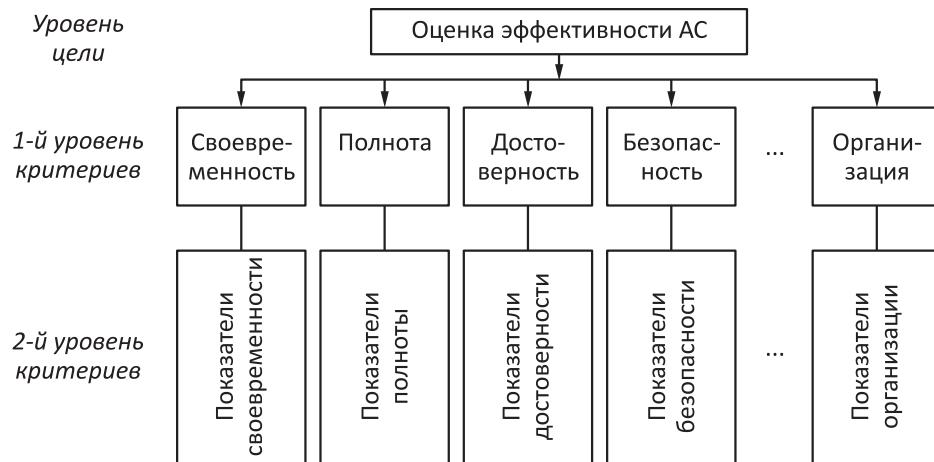


Рис. 2 Иерархия критериев оценки эффективности АС

Этап 2. Сбор исходных данных и расчет частных показателей эффективности 2-го уровня.

Осуществляется сбор данных, характеризующих информационные, технические, эксплуатационные и другие показатели АС. На этапе проектирования характеристики берутся из проектной и рабочей документации, на этапе эксплуатации берутся реальные характеристики, получаемые разработчиком в рамках авторского надзора и службой эксплуатации.

Расчет частных показателей эффективности 2-го уровня производится следующим образом.

Ряд показателей определяется как отношение числа реализованных задач, функций, объектов, устройств и др. к их требуемому (предусмотренному проектом) числу:

$$K = \frac{M_p}{M_{\text{треб}}}, \quad (4)$$

где M_p и $M_{\text{треб}}$ — соответственно число реализованных задач, функций, объектов, устройств и число требуемых.

Так как ряд показателей приведенных выше имеет размерный (т. е. выраженный в каких-либо единицах — секундах, гигабайтах и т. п.) характер, то необходимо провести их нормирование, определив диапазон их изменения от 0 до 1. Для нормирования конкретного показателя используется следующая формула:

$$K_n = \frac{X_p - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (5)$$

где K_n — оценка n -го показателя, используемого для оценки эффективности; X_p — фактическое значение используемого показателя; X_{\min} и X_{\max} — значения показателя, соответствующие нижнему и верхнему допустимому значению.

Ряд показателей определяется экспертным путем, оценивается по десятибалльной шкале и приводится к значениям от 0 до 1.

Этап 3. Сравнительный анализ элементов процесса.

Для этого с привлечением экспертов производится заполнение обратно-симметричных матриц парных сравнений для критериев 1-го и 2-го уровней. Для первого уровня критериев заполняется матрица, представленная в табл. 2, а для второго уровня критериев — матрицы по форме, представленной в табл. 3.

После заполнения матриц производится усреднение суждений экспертов по формуле:

$$a_{ij} = \sqrt[n]{a_{ij}^1 a_{ij}^2 \cdots a_{ij}^n}, \quad (6)$$

где a_{ij} — элементы матриц, заполненных соответствующими экспертами; n — число экспертов.

Этап 4. Определение значений весовых коэффициентов для критериев первого и второго уровня из заполненных матриц по формуле (1).

Этап 5. Оценка степени согласованности экспертов.

Находится индекс согласованности по формуле (3). Затем вычисляется отношение согласованности T . Если величина $T \leq 0,1$, то степень согласованности экспертных данных считается приемлемой.

Этап 6. Расчет частных показателей эффективности по критериям 2-го и 1-го уровней по формулам (4) и (5), а также обобщенного показателя эффективности АС по формуле (2).

Этап 7. Оценка полученных результатов и выработка рекомендаций в отношении направлений и способов улучшения характеристик АС.

В ряде случаев может быть проведена качественная (лингвистическая) оценка полученного результата путем сопоставления аналитической оценки с нормированной фундаментальной шкалой. Общее понятие о порядковой фундаментальной шкале дано в [8]. Вариант интервальной нормированной фундаментальной шкалы оценок приведен в табл. 5 [12].

Таблица 5 Интервальная нормированная фундаментальная шкала оценок

Категория качества	Интервалы нормированной фундаментальной шкалы оценок
Неприемлемое	0,0–0,3
Низкое	0,3–0,5
Удовлетворительное	0,5–0,6
Хорошее	0,6–0,8
Высокое	0,8–1,0

4 Пример применения методики

Рассмотрим пример применения изложенной выше методики для оценки эффективности СРСЦ. Система распределенных ситуационных центров органов государственной власти создается в целях обеспечения информационно-аналитической поддержки стратегического планирования и повышения эффективности государственного управления в Российской Федерации, в том числе при возникновении чрезвычайных (кризисных) ситуаций.

Оценка эффективности СРСЦ осуществлялась на основе исходных данных, полученных в ходе информационного обследования существующих ситуационных центров различных уровней, входящих в систему, а также на основе изучения плановых и проектных документов по развитию и совершенствованию СРСЦ. При этом оценка эффективности проводилась применительно к текущему состоянию СРСЦ (2015 г.) и к планируемому уровню развития СРСЦ к 2020 г.

Для оценки эффективности СРСЦ использовалась трехуровневая иерархия критериев оценки эффективности:

- (1) уровень цели — оценка эффективности СРСЦ (Э);
- (2) первый уровень критериев: развитие системы (Р); своевременность (С); полнота (П); достоверность (Д); организация (О);
- (3) второй уровень критериев — показатели по каждой группе критериев первого уровня. В качестве показателей развития могут быть предложены: степень реализации функциональных задач — Р₁; доля введенных в систему элементов (центров, комплексов и т. п.) — Р₂; доля элементов, взаимодействующих в соответствии с принятым регламентом, — Р₃; доля элементов, взаимодействующих в автоматизированном режиме, — Р₄; полнота охвата подсистемы контроля управления функционированием — Р₅. В качестве показателей своевременности предлагаются: время доведения информации — С₁; время доступа к данным — С₂; время обработки информации — С₃; время выполнения

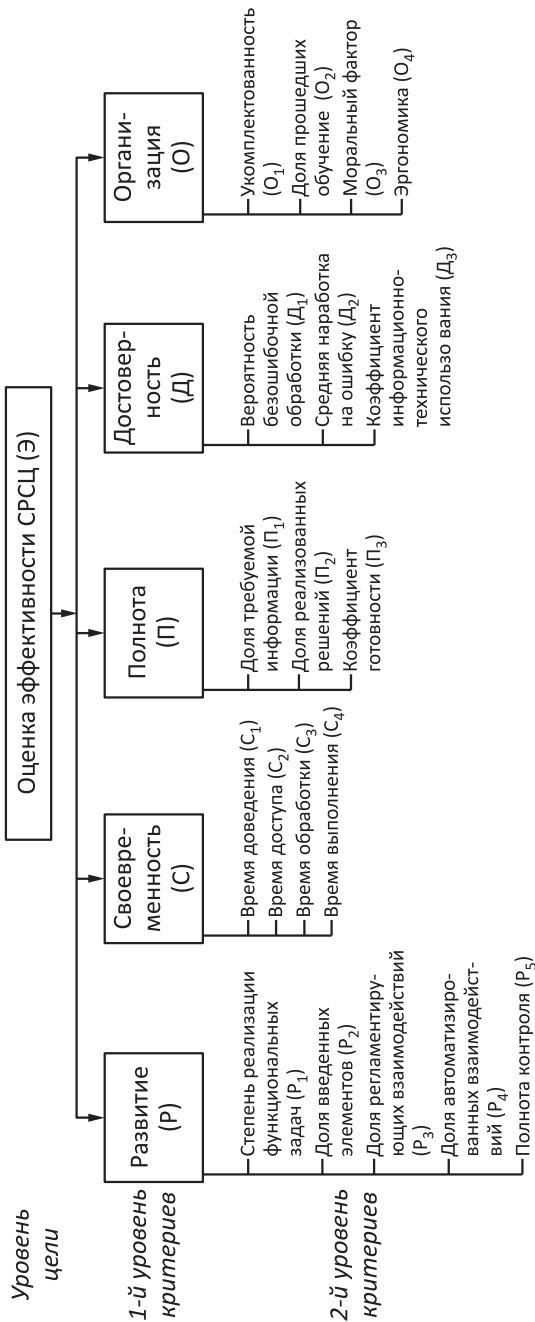


Рис. 3 Иерархия критериев оценки эффективности СРСЦ

нения технологических операций — C_4 . В качестве показателей полноты используются: доля информации, представленной в требуемом объеме, — Π_1 ; доля реализованных управленческих решений — Π_2 ; коэффициент готовности системы — Π_3 . В качестве показателей достоверности приняты: вероятность безошибочной обработки информации в системе — D_1 ; средняя наработка на ошибку — D_2 ; коэффициент информационно-технического использования — D_3 . В качестве организационных показателей применяются: укомплектованность подразделений эксплуатации штатными специалистами — O_1 ; доля специалистов, прошедших специальное обучение, — O_2 ; субъективный (морально-психологический) фактор, отражающий способность и желание персонала осваивать и эффективно обслуживать аппаратно-программные комплексы, — O_3 ; степень реализации эргономических требований — O_4 .

Общий вид иерархической структуры представлен на рис. 3.

Таблица 6 Исходные данные для оценки эффективности СРСЦ

Показатели 1-го уровня	Показатели 2-го уровня	Эффективность	
		2015 г.	2020 г.
Развитие (P)	Степень реализации функциональных задач (P_1)	0,8	0,95
	Доля введенных элементов (P_2)	0,23	0,6
	Доля регламентирующих взаимодействий (P_3)	0,15	0,55
	Доля автоматизированных взаимодействий (P_4)	0,01	0,5
	Полнота контроля (P_5)	0,1	0,5
Своевременность (C)	Время доведения (C_1)	0,75	0,95
	Время доступа (C_2)	0,7	0,95
	Время обработки (C_3)	0,7	0,9
	Время выполнения (C_4)	0,7	0,9
Полнота (Π)	Доля требуемой информации (Π_1)	0,5	0,9
	Доля реализованных решений (Π_2)	0,6	0,9
	Коэффициент готовности (Π_3)	0,95	0,99
Достоверность (D)	Вероятность безошибочной обработки (D_1)	0,8	0,99
	Средняя наработка на ошибку (D_2)	0,9	0,99
	Коэффициент информационно-технического использования (D_3)	0,9	0,99
Организация (O)	Укомплектованность (O_1)	0,8	0,9
	Доля прошедших обучение (O_2)	0,5	0,8
	Моральный фактор (O_3)	0,9	0,9
	Эргономика (O_4)	0,8	0,9

Исходные данные для оценки эффективности сведены в табл. 6. При этом ряд показателей рассчитан по формулам (4) и (5), а ряд определен экспертным путем.

Коэффициент готовности АС определяется по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_o}{T_o + T_b},$$

где K_{Γ} — коэффициент готовности; T_o — среднее время наработки изделия на отказ; T_b — среднее время восстановления работоспособности изделия.

На этапе проектирования коэффициент готовности определяется расчетным путем на основе данных, приведенных в формулярах конкретных технических средств, а в ходе эксплуатации — по результатам сбора и обработки статистических данных об отказах и времени восстановления.

Коэффициент информационно-технического использования определяется по формуле:

$$K_{ти} = T_{раб} - \frac{T_k + T_i}{T_{раб}},$$

где $K_{ти}$ — коэффициент информационно-технического использования; $T_{раб}$ — среднее время работы системы по назначению; T_k — среднее время контроля; T_i — среднее время идентификации и исправления ошибок.

Матрица парных сравнений для критериев первого уровня, подготовленная тремя экспертами, представлена в табл. 7.

Усредненные по формуле (6) по трем экспертам значения элементов матрицы для критериев первого уровня приведены в табл. 8.

Аналогичным образом подготовлены матрицы сравнений для критериев второго уровня, представленные в табл. 9–13.

Таблица 7 Оценки трех экспертов по критериям первого уровня

	Эксперт 1					Эксперт 2					Эксперт 3				
	P	C	П	Д	O	P	C	П	Д	O	P	C	П	Д	O
P	1	5	3	7	4	1	4	3	6	2	1	5	2	4	3
C	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{3}$	3	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	1	$\frac{1}{3}$	5	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$
П	$\frac{1}{3}$	3	1	5	2	$\frac{1}{3}$	3	1	5	$\frac{1}{2}$	2	5	1	4	2
Д	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{4}$	2	$\frac{1}{4}$	1	$\frac{1}{2}$
O	$\frac{1}{4}$	2	$\frac{1}{2}$	4	1	$\frac{1}{2}$	4	2	7	1	$\frac{1}{3}$	3	$\frac{1}{2}$	2	1

Таблица 8 Оценки по критериям первого уровня, усредненные по трем экспертам

Критерий	Р	С	П	Д	О
Р	1	4,57	2,59	5,42	2,85
С	0,22	1	0,28	1,94	0,35
П	0,38	3,5	1	4,57	1,25
Д	0,18	0,51	0,22	1	0,26
О	0,35	2,85	0,79	3,77	1

Таблица 9 Оценка для критериев второго уровня по показателю развития

Критерий	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
P ₁	1	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	3
P ₂	5	1	2	3	6
P ₃	4	$\frac{1}{2}$	1	3	5
P ₄	3	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	3
P ₅	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1

Таблица 10 Оценка для критериев второго уровня по показателю своевременности

Критерий	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
C ₁	1	$\frac{1}{3}$	3	5
C ₂	3	1	4	5
C ₃	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	1	4
C ₄	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	1

Таблица 12 Оценка для критериев второго уровня по показателю организации

Критерий	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄
O ₁	1	3	6	4
O ₂	$\frac{1}{3}$	1	5	3
O ₃	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{3}$
O ₄	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	3	1

Таблица 11 Оценка для критериев второго уровня по показателю полноты

Критерий	П ₁	П ₂	П ₃
П ₁	1	$\frac{1}{3}$	4
П ₂	3	1	5
П ₃	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	1

Таблица 13 Оценка для критериев второго уровня по показателю достоверности

Критерий	Д ₁	Д ₂	Д ₃
Д ₁	1	3	5
Д ₂	$\frac{1}{3}$	1	4
Д ₃	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	1

Таблица 14 Значения весовых коэффициентов для критериев первого уровня

Критерий	Собственный вектор	Вес критерия
P	2,83	0,44
C	0,52	0,08
П	1,5	0,23
Д	0,35	0,06
О	1,24	0,19

Таблица 15 Значения весовых коэффициентов для критериев второго уровня

Показатели	Критерий	Вес
Развитие	P ₁	0,08
	P ₂	0,42
	P ₃	0,29
	P ₄	0,16
	P ₅	0,05
Своевременность	C ₁	0,34
	C ₂	0,48
	P ₃	0,13
	C ₄	0,05
Полнота	П ₁	0,28
	П ₂	0,62
	П ₃	0,1
Достоверность	Д ₁	0,62
	Д ₂	0,28
	Д ₃	0,1
Организация	O ₁	0,54
	O ₂	0,27
	O ₃	0,06
	O ₄	0,13

Таблица 16 Значения частных показателей эффективности

Частные показатели	2015 г.	2020 г.
Э _р	0,21	0,58
Э _с	0,72	0,94
Э _п	0,61	0,91
Э _д	0,84	0,99
Э _о	0,73	0,87

Далее определяем значения весовых коэффициентов для критериев первого и второго уровня из заполненных матриц по формуле (1). Вычисленные значения весовых коэффициентов приведены в табл. 14 и 15.

Далее оценим степень согласованности экспертов. Для этого используем данные табл. 8 и 14. В результате расчетов получаем $\lambda_{\max} = 5,12$. По формуле (3) определяем индекс согласованности $L = 0,03$. Далее с использованием табл. 4 определяем отношение согласованности $T = 0,026$.

В соответствии с приведенным выше критерием степень согласованности экспертов является приемлемой.

Осуществляем расчет частных показателей эффективности по критериям второго и первого уровня, а также обобщенного показателя эффективности СРСЦ.

Вначале определяем значения частных показателей эффективности по пяти критериям первого уровня по формуле (2) с использованием табл. 6 и 15. Результаты расчетов сведены в табл. 16.

Затем с использованием табл. 14 и 16 рассчитываем обобщенный показатель эффективности СРСЦ для периодов 2015 и 2020 гг.:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{CPCZ1}} &= 0,21 \cdot 0,44 + 0,72 \cdot 0,08 + 0,61 \cdot 0,23 + 0,84 \cdot 0,06 + \\ &\quad + 0,73 \cdot 0,19 = 0,48; \\ \mathcal{E}_{\text{CPCZ2}} &= 0,58 \cdot 0,44 + 0,94 \cdot 0,08 + 0,91 \cdot 0,23 + 0,99 \cdot 0,06 + \\ &\quad + 0,87 \cdot 0,19 = 0,76.\end{aligned}$$

Таким образом, по интервальной нормированной фундаментальной шкале оценок (см. табл. 5) современный уровень развития СРСЦ соответствует низкому уровню качества. К 2020 г. планируется достичь хорошего уровня по данной шкале.

Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы:

- реализация планов по созданию и развитию СРСЦ позволит к 2020 г. повысить ее эффективность на 25%–30%;
- повышение эффективности отдельных уровней и СРСЦ в целом возможно на основе увеличения количества ситуационных центров на всех уровнях до плановых показателей, а также за счет оснащения всех объектов комплексами информационного взаимодействия с целью создания однородной программно-аппаратной среды на единых технических решениях, обеспечивающих реализацию единого регламента взаимодействия в автоматизированном и неавтоматизированном режимах.

5 Заключение

Создание и развитие АС требует объективной оценки их состояния и выявления проблемных аспектов. Для решения указанной задачи в статье предложена

методика оценки эффективности АС на основе метода анализа иерархий, учитывая совокупность множества количественных данных о функционировании АС в сочетании с применением экспертных оценок. Данная методика отражает достигнутый уровень развития АС и позволяет выявить тенденции их развития.

Для иллюстрации методики приведен пример оценки эффективности СРСЦ применительно к текущему состоянию и к планируемому уровню развития.

Литература

1. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология: Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы: Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2005. 14 с.
2. Окунев Ю. Б., Плотников В. Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи. — М.: Связь, 1976. 183 с.
3. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. — М.: Наука, 1980. 208 с.
4. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С., Шабанов А. П. К вопросу о сравнительной оценке эффективности ситуационных центров // Системы и средства информатики, 2013. Т. 23. № 2. С. 155–171.
5. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С., Шабанов А. П. Методический подход к оценке эффективности ситуационных центров // Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике: Сб. статей 15-й Междунар. науч.-практич. конф. — СПб.: СПбГТУ, 2013. Т. 2. С. 37–39.
6. Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Системные аспекты эффективности ситуационных центров // Вестник Московского университета имени С. Ю. Витте. Сер. 1: Экономика и управление, 2013. № 2. С. 110–123.
7. Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Эффективность ситуационных центров и человеческий фактор // Вестник Московского университета имени С. Ю. Витте. Сер. 1: Экономика и управление, 2013. № 3. С. 43–53.
8. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. — М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
9. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
10. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. — М.: ЛКИ, 2008. 360 с.
11. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. — М.: Логос, 2007. 392 с.
12. Воронин А. Н. Многокритериальная оценка альтернатив. http://www.foibg.com/ibs_isc/ibs-28/ibs-28-p22.pdf.

Поступила в редакцию 09.06.15

REGARDING AUTOMATED SYSTEMS EFFICIENCY EVALUATION USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

A. A. Zatsarinny and Y. S. Ionenkov

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

Abstract: The article continues a series of works which are devoted to complex systems efficiency evaluation. The automated system efficiency evaluation using Analytic Hierarchy Process (AHP) is considered. The article shows the main peculiarities and advantages of the method. A technique of automated systems efficiency evaluation using AHP is developed. A core of the technique is representation of the task as a hierarchical structure of some levels, herein it is a three-level structure. The indexes showing efficiency at each criteria level of automated systems evaluation are suggested. The main steps of calculation by the technique are presented. The formulas for calculation of particular and general efficiency indexes are given. The article makes some propositions concerning qualitative (lingual) evaluation of the result via application of analytic mark to the normalized fundamental scale. The article presents an example of applying the technique for the distributed system of state situational centers concerning their current and planned state.

Keywords: automated system; efficiency; index; criteria; alternative; timeliness; reliability; information completeness; hierarchy; situational center

DOI: 10.14357/08696527150310

References

1. GOST 34.003-90. 2005. Informatsionnaya tekhnologiya. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Avtomatizirovannye sistemy. Terminy i opredeleniya [Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Terms and definitions]. Collection of State Standards. Moscow: Standardinform Publs. 14 p.
2. Okunev, Y. B., and V. G. Plotnikov. 1976. *Printsipy sistemnogo podkhoda k proektirovaniyu v tekhnike svyazi* [Systematic approach principles to design in communication technics]. Moscow: Svyaz'. 183 p.
3. Venttsel, E. S. 1980. *Issledovanie operatsiy: Zadachi, printsipy, metodologiya* [Operation investigation: Tasks, principles, methodology]. Moscow: Nauka. 208 p.
4. Zatsarinny, A. A., Y. S. Ionenkov, and A. P. Shabanov. 2013. K voprosu o sravnitel'noy otsenke effektivnosti situatsionnykh tsentrov [Regarding comparative evaluation of situational centers efficiency]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 23(2):155–171.

5. Zatsarinny, A. A., Y. S. Ionenkov, and A. P. Shabanov. 2013. Metodicheskiy podkhod k otseinke effektivnosti situatsionnykh tsentrov [Methodical approach to assessing the effectiveness of situational centers]. *Sb. statey 15-y Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. "Fundamental'nye i Prikladnye Issledovaniya, Razrabotka i Primenenie Vysokikh Tekhnologiy v Promyshlennosti i Ekonomike."* [Collection of papers for the 15th Scientific-Practical Conference (International) "Fundamental and Applied Research, Development and Application of High Technologies in Industry and Economy"]. St. Petersburg: Polytechnic University Publs. 2: 37–39.
6. Zatsarinny, A. A., and A. P. Shabanov. 2013. Sistemnye aspekty effektivnosti situatsionnykh tsentrov [System aspects of effectiveness of situational centers]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta imeni S. Yu. Vitte. Ser. 1: Ekonomika i upravlenie* [Herald of S. Witte Moscow University. Ser. 1: Economy and management] 2:110–123.
7. Zatsarinny, A. A., and A. P. Shabanov. 2013. Effektivnost' situatsionnykh tsentrov i chelovecheskiy faktor [Effectiveness of situational centers and the human factor]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta imeni S. Yu. Vitte. Ser. 1: Ekonomika i upravlenie* [Herald of S. Witte Moscow University. Ser. 1: Economy and management] 3: 43–53.
8. Saati, T., and K. Kerns. 1991. *Analiticheskoe planirovaniye. Organizatsiya sistem* [Analytic planning. Systems organization]. Moscow: Radio i svyaz'. 224 p.
9. Saati, T. 1993. *Priniatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision making. Analytic hierarchy process]. Moscow: Radio i svyaz'. 278 p.
10. Saati, T. 2008. *Priniatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh. Analiticheskie seti* [Decision making in dependences and feedbacks. Analytical networks]. Moscow: LKI Publ. 360 p.
11. Larichev, O. I. 2007. *Teoriya i metody priniyatiya resheniy* [Theory and methods of decision making]. Moscow: Logos. 392 p.
12. Voronin, A. N. Mnogokriterial'naya otsenka al'ternativ [Multicriterial evaluation of alternatives]. Available at: http://www.foibg.com/ibs_jsc/ibs-28/ibs-28-p22.pdf (accessed October 15, 2015).

Received June 9, 2015

Contributors

Zatsarinny Alexander A. (b. 1951)— Doctor of Science in technology, professor, Deputy Director, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; azatsarinny@ipiran.ru

Ionenkov Yurij S. (b. 1956) — senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; uionenkov@ipiran.ru

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ В ЧАСТИ ТРЕБОВАНИЙ К АРХИТЕКТУРНОМУ ПОСТРОЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗАЦИЙ – УЧАСТНИКОВ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА РОССИИ

A. A. Зацаринный¹, Э. В. Киселев²

Аннотация: Статья продолжает серию публикаций, посвященных формированию нормативно-технической базы для создания информационных систем (ИС) организаций — участников единого информационного пространства Российской Федерации (ЕИП РФ). Представлены обобщенные требования к системам, включая: базовые принципы разработки проектных решений построения и создания систем; необходимые свойства систем; состав необходимого документационного обеспечения систем; направления возможного развития ИС; требования по использованию математического и натурального моделирования при создании и эксплуатации систем; требования по автоматизированному управлению функционированием систем; соблюдение принципа обеспечения информационной безопасности (ИБ) при построении систем; выполнение принципа экономической целесообразности и обоснованности финансовых затрат на развертывание и поддержание работоспособности и актуализации систем; обязательность соблюдения принципов преемственности, направленной эволюции и максимального использования вложенных инвестиций в системы; акцентирование внимания на особую значимость решения организационных вопросов при проектировании, создании и эксплуатации систем в течение их жизненного цикла. Положения данной статьи ориентированы на использование в качестве научно-методической основы при формировании нормативно-технической базы построения ИС многочисленных организаций — участников ЕИП РФ.

Ключевые слова: единое информационное пространство Российской Федерации (ЕИП РФ); организация — участник ЕИП РФ (УЕИП); системный подход; архитектура единой информационной системы УЕИП; защищенные информационные ресурсы; централизация; интеграция; информационная безопасность; телекоммуникационное обеспечение

DOI: 10.14357/08696527150311

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

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ekiselev @ipiran.ru

1 Вводные положения

Ранее отмечалось [1, 2], что потенциально участниками единого информационного пространства Российской Федерации (далее — УЕИП) могут стать многочисленные и разнообразные организации. Информатизацию УЕИП следует предусматривать на основе системного подхода применительно к архитектурам единых ИС (ЕИС) УЕИП. Такой подход предусматривает *создание стратегии УЕИП в сфере своей деятельности на заданный период времени* (далее — стратегия). Стратегия — определенная программа действий, разработанная руководством для поддержания эффективного функционирования и развития УЕИП. При разработке стратегии основное внимание следует уделять формированию планов, которые необходимы для контроля эффективности достижения стратегических ориентиров в сфере деятельности УЕИП на заданный период времени. По существу, стратегия — это генеральная программа развития организации, определяющая стратегические задачи, их приоритеты, методы привлечения и распределения ресурсов и последовательность шагов по достижению стратегических целей и в наибольшей степени соответствующая сложившемуся состоянию внутренней и внешней среды для УЕИП.

Стратегия должна включать перечень взаимоувязанных мероприятий по достижению заданных целевых показателей деятельности УЕИП, иметь упреждающий характер за счет механизмов адаптации в условиях изменений в сфере своей деятельности.

Стратегия должна:

- содержать конкретные цели, достижение которых является решающим для достижения заданных показателей в соответствующей сфере деятельности;
- поддерживать рациональную инициативу на соответствующем уровне (федеральном, региональном, местном);
- концентрировать главные усилия в нужное время в нужном месте;
- предусматривать гибкость поведения и принятия решений для достижения требуемого результата при минимуме ресурсов;
- обозначать скоординированное руководство на заданных уровнях (федеральном, региональном, муниципальном);
- предполагать корректное расписание действий на заданных уровнях (федеральном, региональном, муниципальном);
- обеспечивать гарантированные ресурсы для работы в сфере своей деятельности.

Стратегия должна выступать в качестве нормативного инструмента обоснования, выработки и реализации долгосрочных целей в сфере своей деятельности, а также как средство связи УЕИП с «внешней средой»: с другими организациями — участниками ЕИП РФ различных уровней, с физическими лицами —

гражданами РФ, при необходимости с соответствующими органами зарубежных государств (согласно установленному нормативно-правовому порядку).

Стратегия должна включать две части:

- (1) собственно стратегию деятельности и развития УЕИП (применительно к организационной сфере своей деятельности);
- (2) стратегию информатизации организации — УЕИП на основе положений первой части.

2 Основные требования к архитектурному построению единых информационных систем организаций — участников единого информационного пространства России

1. В соответствии с положениями выработанной стратегии для организации — участника ЕИП РФ при информатизации необходимо *решать одновременно двуединую укрупненную задачу*:

- (1) ликвидировать внутри пространства данной конкретной организации пресловутую «лоскутную» информатизацию путем консолидации и эволюционного создания ЕИС [1, 2];
- (2) посредством этой же ЕИС подключить и органично ввести данную организацию в ЕИП РФ на правах полноценного участника.

Решение такой двуединой задачи позволит обеспечить эффективную информатизацию высокого, качественно нового уровня для каждой конкретной организации. Действительно, ЕИС — это инфраструктура организации, которая поддерживает решение, прежде всего, совокупности собственных актуальных задач. При этом такая инфраструктура обеспечивает достижение своих целей, а именно:

- ЕИС охватывает все физические объекты, объединяет на качественно новом уровне функционал всей совокупности существующих информационных систем. Таким образом создается единое внутреннее пространство своей организации. Единая ИС становится основой, единственной системообразующей информационной инфраструктурой, на базе и в рамках которой конструируются все другие подсистемы / компоненты и посредством которой решается совокупный функционал для своей организации. При этом ставится задача минимизации совокупной стоимости владения единой информационной системой;
- одновременно ЕИС берет на себя согласование, подключение и органичное введение данной организации в ЕИП РФ как полноценного участника.

2. Информатизация многочисленных УЕИП, построенная на основе системного подхода к формированию нормативно-технической базы и выработанных соответствующих стратегий, напрямую затрагивает архитектурное построение

таких ИС [3–7], в том числе предусматривается *обобщение и соответствующее типизирование архитектур ИС*.

В свою очередь, типизация архитектур предварительно предполагает обобщение определенных групп функций организаций — участников ЕИП РФ. Для примера можно рассмотреть определенное обобщение функций УЕИП в сферах государственного управления России. Такие *обобщенные функции* включают:

- выработку и реализацию государственной политики;
- нормативно-правовое регулирование;
- правоприменительные функции;
- государственный контроль (надзор) — федеральный или региональный;
- предоставление (исполнение) государственных услуг.

Применительно к эффективной информатизации УЕИП *государственное управление в сфере деятельности для конкретного участника* в обобщенном виде охватывает следующие процессы:

- *сбор и обработку (анализ) информации*, относящейся к сфере деятельности организации;
- *прогнозирование*, т. е. научное предвидение изменений в развитии каких-либо явлений или процессов в сфере деятельности на основе объективных данных и достижений науки;
- *планирование*, т. е. определение направлений, целей управленческой деятельности и соответствующих способов, средств достижения этих целей;
- *собственно организацию*, т. е. формирование системы управления, упорядочение управленческих отношений между субъектами и объектами управления, определение прав и обязанностей, структуры органов, подчиненных организаций, подбор и расстановка кадров и т. д.;
- *регулирование или распорядительство*, т. е. установление режима в сфере деятельности по достижению целей и задач управления, регулирование поведения управляемых объектов, подготовка директив, указаний, предписаний и др.;
- *координацию и взаимодействие*, осуществляемые для достижения общих целей управления в сфере деятельности;
- *контроль и учет*, состоящие в определении степени соответствия фактического состояния объекта управления заданному.

В целом государственное управление в сфере деятельности многочисленных УЕИП может охватывать совокупность сфер государственного управления федерального, регионального и муниципального уровней.

Естественно, что в соответствии со сферами их деятельности у различных УЕИП самые разнообразные информационные ресурсы (ИР), которыми они

обмениваются между собой как внутри своих организаций, так в рамках ЕИП РФ. Под ИР сфер государственного управления обобщенно понимается совокупность данных, представляющих ценность для этих сфер и выступающих в качестве материальных ресурсов. К ним относятся файлы данных, документы, тексты, таблицы, графики, аудиоинформация, видеоинформация, специфическая информация (например, дактилоскопическая идентификационная) и др. Соответственно, необходимы ЕИС УЕИП как структуры, обеспечивающие хранение, поиск и выдачу информации по запросам пользователей различных сфер деятельности, включая население РФ и иностранных граждан.

Правильное и четкое выполнение различными УЕИП возложенных на них функций и решение сопутствующих задач невозможно без эффективной информатизации собственной сферы деятельности на высоком, качественно новом уровне применительно к каждой организации — участнику ЕИП [7]. Данная ситуация требует рассмотрения многочисленных вопросов исключительно на базе системного подхода.

В [1, 2] определено, что организации-участники могут входить в ЕИП РФ посредством систем двух видов: ЕИС и единая информационно-телекоммуникационная система (ЕИТКС). Отличия только в том, что в ЕИТКС по сравнению с ЕИС более существенную роль играет телекоммуникационная составляющая.

Выбор архитектуры и создание ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП на основе требований системного подхода и стратегии должны обеспечить *эволюционный переход от существующей «лоскутной» информатизации с постепенной заменой используемых ИС* в этой организации.

3. Архитектура ЕИС (ЕИТКС) каждой УЕИП в общем случае должна быть нацелена на обеспечение информационной, аналитической, документационной, инструментальной и технологической поддержки принятия решений и выполнения основных функций всего спектра сферы деятельности для конкретной организации применительно к соответствующему уровню — федеральному, региональному, территориальному (муниципальному).

Ниже излагаются *требования к архитектурному построению обобщенной, типизированной архитектуры ЕИС (ЕИТКС) организации — участника ЕИП РФ.*

4. В состав архитектуры ЕИС (ЕИТКС) организации — участника ЕИП РФ в общем случае могут быть включены *три составные части — три сегмента*:

- (1) *открытый сегмент (О-сегмент)*, который оперирует открытой информацией и аккумулирует открытые ИР. В рамках данного сегмента создается открытый контур ЕИС (ЕИТКС) (О-контур [2]);
- (2) *конфиденциальный сегмент (К-сегмент)*, оперирующий конфиденциальной информацией и аккумулирующий конфиденциальные ИР. В рамках данного сегмента создается конфиденциальный контур ЕИС (ЕИТКС) (К-контур [2]);

- (3) *закрытый сегмент (З-сегмент)*, оперирующий только закрытой информацией. В рамках данного сегмента создается закрытый контур ЕИС (ЕИТКС) (З-контур [2]).

Таким образом, *ЕИС (ЕИТКС) в общем случае фактически будет состоять из трех автоматизированных ИС (АИС), которые представляют три перечисленных сегмента*. Между АИС сегментами посредством шлюзов создается слабая связность внутри ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП, допускающая при необходимости одностороннюю передачу [2]: только из открытого контура в конфиденциальный контур, только из конфиденциального контура в закрытый контур. Открытый сегмент через собственный шлюз получает от доступных источников открытую первичную информацию.

Число необходимых сегментов ЕИС (ЕИТКС) зависит от потребностей конкретной УЕИП.

5. Предлагается выделить следующие *обобщенные требования системного подхода* к построению, созданию и эксплуатации ЕИС (ЕИТКС) организации — участника ЕИП РФ:

- (а) *общность использования*: реализация ЕИС (ЕИТКС) должна обеспечивать взаимодействие неопределенного круга ИС — как собственных, так и внешних, в том числе не известных заранее. Это означает, что реализация ЕИС (ЕИТКС) не должна зависеть от ИС, взаимодействие с которыми она обеспечивает;
- (б) *использование открытых стандартов доступа*: ЕИС (ЕИТКС) должна обеспечивать доступ к предоставляемым ею сервисам посредством единобразных интерфейсов, отвечающих критериям открытых стандартов;
- (в) *технологическая нейтральность*: ЕИС (ЕИТКС) не должна требовать от прикладных и иных ИС использования какой-либо конкретной технологии, программного обеспечения или аппаратной платформы;
- (г) *стабильность*: неизменность установленных основных характеристик, форматов, регламентов функционирования ЕИС (ЕИТКС) должна обеспечиваться в течение необходимого продолжительного времени;
- (д) *преемственность*: в случае модернизации ЕИС (ЕИТКС) должна обеспечивать продолжительную поддержку функционирования необходимых замещаемых протоколов, форматов, спецификаций, предоставление сервисов по замещаемым регламентам;
- (е) *повсеместная доступность*: ЕИС (ЕИТКС) должна обеспечивать доступность своих сервисов в пределах своей территориальной деятельности, а в особых случаях (по согласованию) — за ее пределами;
- (ж) *постоянная работоспособность*: ЕИС (ЕИТКС) должна обеспечивать функционирование и доступность своих сервисов круглосуточно, без перерывов и отказов в обслуживании — в пределах установленных значений;

(3) *нагрузочная способность и способность к масштабированию:* ЕИС (ЕИТКС) должна обладать достаточным запасом по пропускной способности и вычислительной нагрузке — в пределах установленных значений, в том числе в условиях прогнозируемых пиковых нагрузок.

Перечисленные требования при выборе архитектуры в обобщенном виде должны рассматриваться как ориентиры при выработке предложений и решений, относящихся к общесистемным и системно-техническим вопросам построения, создания и эксплуатации ЕИС (ЕИТКС) различных УЕИП. Эти требования должны конкретизироваться, детализироваться и использоваться в процессе технического проектирования ЕИС (ЕИТКС) каждой конкретной УЕИП.

6. Определим следующие базовые принципы разработки проектных решений построения и создания ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП:

- преемственность по отношению к существующей инфраструктуре;
- комплексность автоматизации (информатизации) процессов в ЕИС (ЕИТКС);
- системность построения ЕИС (ЕИТКС);
- открытость архитектуры, во-первых, обеспечивающая взаимодействие сегментов и компонентов ЕИС (ЕИТКС) друг с другом через стандартные интерфейсы, во-вторых, позволяющая использовать различные стандартизованные технические средства;
- обеспечение автоматизации и оперативности управления ЕИС (ЕИТКС) и ее составными частями;
- использование математического и натурного моделирования при создании и эксплуатации ЕИС (ЕИТКС);
- комплексное обеспечение ИБ в ЕИС (ЕИТКС);
- целесообразность и обоснованность затрат на развертывание и поддержание работоспособности и актуализации автоматизированных ИР (АИР) в ЕИС (ЕИТКС);
- направленная эволюция и максимальное использование вложенных инвестиций при дальнейшем развитии и модернизации ЕИС (ЕИТКС);
- консолидация и интеграция как в узком смысле — при построении ЕИС (ЕИТКС) и ее сегментов и компонентов, так и в широком смысле — при выполнении ЕИС (ЕИТКС) функций по обеспечению информационного взаимодействия с различными и многочисленными УЕИП РФ в электронной форме.

7. В процессе разработки, создания и развития архитектура ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП должна ориентироваться на достижение состояния, характеризующегося совокупностью следующих свойств:

- *адаптивность*: приспособляемость ЕИС (ЕИТКС) к изменениям внешних условий, в том числе к изменениям организационно-функциональной структуры, нормативной базы (или нормативных баз), телекоммуникационной среды;
- *расширяемость*: обеспечение возможности добавления новых или изменения имеющихся функций без изменения остальных функциональных компонентов ЕИС (ЕИТКС);
- *мобильность (переносимость)*: обеспечение возможности переноса специального программного обеспечения и данных при модернизации или замене аппаратно-программных платформ;
- *интероперабельность*: способность к взаимодействию с другими информационными системами, не входящими в состав ЕИС (ЕИТКС) (в более широком смысле интероперабельность — способность программных, информационных или аппаратных ресурсов допускать совместное их использование с другими, заранее не известными при их создании ресурсами [8]);
- *безопасность*: состояние должной защищенности АИР, сегментов и компонентов ЕИС (ЕИТКС).

Приобретение архитектурой ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП указанных свойств обеспечит выполнение требований, предъявляемых к такому уникальному инфраструктурному образованию.

8. В целом ЕИС (ЕИТКС) (включая ее архитектуру) конкретной УЕИП должна создаваться как целостная, территориально распределенная (как правило), многофункциональная, информационно-коммуникационная система, имеющая должное документационное обеспечение, в том числе такая ЕИС (ЕИТКС) должна иметь полноценный комплект (комплекты) эксплуатационной документации. При этом должны быть две части эксплуатационной документации на единую систему: относящейся к внутреннему функционированию и к функционированию в составе ЕИП РФ как мегасистемы на правах участника (подробнее см. [1, 2]).

Как правило, *особенностью создания ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП является разработка и ввод ее в эксплуатацию очередями*. Это связано с существенной сложностью системы (в том числе с учетом наличия унаследованной «лоскутной» информатизации), особенностями организации и финансирования работ, с учетом значительных временных затрат, большой кооперации исполнителей работ.

9. Дадим специально некоторые вводные, более развернутые положения, касающиеся системного подхода при определении архитектуры ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП — в части достижения совокупности таких свойств, как адаптивность, расширяемость, мобильность (переносимость), интероперабельность, безопасность [8, 9].

Приобретение ЕИС (ЕИТКС) определенной УЕИП таких свойств, как адаптивность, расширяемость, мобильность (переносимость), интероперабельность, обеспечивается:

- построением данной системы на принципах открытой архитектуры;
- использованием при разработке и эксплуатации средств и стандартов открытых систем (по возможности). В том числе следует учитывать ряд русифицированных рекомендаций и стандартов международных организаций [8, 10, 11];
- обеспечением взаимодействия сегментов и их компонентов ЕИС (ЕИТКС) различных УЕИП друг с другом через стандартные интерфейсы, позволяющие использовать различные стандартизованные технические и программные средства.

Рекомендуется использование в процессе разработки сегментов и компонентов ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП общего программного обеспечения (ОПО) и технического обеспечения (ТО) ведущих производителей (отечественных и мировых), разработанных на основе системы взаимоувязанных международных стандартов с использованием современных технологий и принципов проектирования. В определенных случаях целесообразно разрабатывать и внедрять системы межведомственных и ведомственных нормативно-технических документов, основывающихся на международном опыте в области информационных технологий.

Приобретение ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП важнейшего свойства «безопасность», оцениваемого достижением состоянияальной защищенности каждого сегмента ЕИС в соответствии с установленными требованиями, обеспечивается учетом при разработке проектных решений построения ЕИС (ЕИТКС) *принципов обеспечения информационной безопасности*, которые реализуются путем проведения процесса создания конкретной системы в строгом соответствии с требованиями ГОСТ Р 51583-2000 [9]. С этой целью в составе каждого сегмента ЕИС (ЕИТКС) создается своя подсистема комплексного обеспечения информационной безопасности (ПКОИБ): О-ПКОИБ, К-ПКОИБ, З-ПКОИБ. ПКОИБ своего сегмента позволяет обеспечить комплексную защиту информации, ИР, персональных данных и других составляющих, передаваемых, накапливаемых и обрабатываемых в каждом сегменте ЕИС (ЕИТКС) путем адекватной защиты от угроз. В свою очередь, адекватность защиты от угроз для каждого сегмента ЕИС (ЕИТКС) должна быть определена в согласованном с ФСБ России и Гостехкомиссией (ФСТЭК) России и утвержденном документе «Модель нарушителя и модель угроз». Также должны выполняться установленные требования по защите информации и персональных данных для каждого сегмента ЕИС (ЕИТКС). Работы по созданию О-ПКОИБ, К-ПКОИБ, З-ПКОИБ должны проводиться в соответствии с федеральными законами, стандартами, действующими руководящими и нормативными документами уполномоченных

органов исполнительной власти, включая нормативные документы ФСБ России и ФСТЭК России.

Сегменты ЕИС (ЕИТКС), обрабатывающие информацию и персональные данные, должны быть защищены и аттестованы по требованиям безопасности информации в соответствии с действующими руководящими документами ФСБ России и ФСТЭК России. Объектами защиты в сегментах ЕИС (ЕИТКС) являются программно-технические комплексы (ПТК) различного назначения, размещаемые на объектах ЕИС (ЕИТКС) определенной УЕИП.

10. *Принципы системности построения и открытости архитектуры* предусматривают, в частности, возможность развития ЕИС (ЕИТКС) конкретных УЕИП в следующих направлениях [6]:

- *увеличение количества пользователей ЕИС (ЕИТКС);*
- *расширение состава внешних ИС (АИС), взаимодействующих с ЕИС (ЕИТКС) данной УЕИП;*
- *расширение возможностей контроля и управления функционированием системы;*
- *повышение уровня унификации и стандартизации в системе;*
- *повышение производительности системы;*
- *совершенствование форм представления информации, используемых в системе;*
- *консолидация, интеграция и централизация ИР в системе.*

11. Создание и эффективное функционирование ЕИС (ЕИТКС) конкретной УЕИП — это сложные процессы, если принять во внимание сложность системы: ее, как правило, территориальную распределенность и взаимодействие с большим числом разнородных ИС (АИС) других органов и организаций. Поэтому необходимо использовать *методы математического и натурного моделирования*.

Математическое моделирование целесообразно использовать для определения характеристик системы, оценки и прогнозирования поведения сегментов и их компонентов в различных ситуациях, совершенствования архитектуры, определения характеристик настройки и требований к сегментам и компонентам системы, оценки уровня качества и определения путей повышения эффективности функционирования и эксплуатации. Может быть также разработан комплекс математических моделей разного назначения, например: математическая модель телекоммуникационной системы ЕИС (ЕИТКС), модель надежности системы, сервисная модель эксплуатации и сопровождения системы и др.

Следует в обязательном порядке отработать для ЕИС (ЕИТКС) *модель создания профиля среды* как открытой системы в соответствии с принятой стратегией и согласно рекомендациям руководства Р 50.1.041-2002 [11]. При этом применительно к ЕИС (ЕИТКС) должны быть выполнены последовательно пять

этапов моделирования системы: область действия, анализ требований, логический проект, физический проект, эксплуатационный проект (подробнее см. в [2]).

В ЕИС (ЕИТКС) необходимо создать постоянно действующий имитационно-отладочный комплекс и разработать соответствующие имитаторы с целями:

- проведения натурного моделирования;
- отладки и испытаний сегментов ЕИС (ЕИТКС) соответствующей УЕИП и их компонентов;
- проверки соответствия требованиям нормативных документов и сертификации сегментов ЕИС (ЕИТКС) и их компонентов (в том числе для имитации отсутствующих компонентов системы);
- предварительной отработки различных изменений, планируемых к внесению их в конфигурацию действующей ЕИС (ЕИТКС) соответствующей УЕИП, и др.

12. Учет принципа обеспечения автоматизации управления инфраструктурой ЕИС (ЕИТКС) соответствующей УЕИП при разработке проектных решений предусматривает выполнение следующих функций:

- организации автоматизированного сбора и хранения данных об аппаратной и программной конфигурации сегментов ЕИС (ЕИТКС) и их компонентов;
- автоматизированного управления ЕИС (ЕИТКС) данной УЕИП в целом и ее сегментами;
- диагностики состояния и поиска неисправностей, включая обеспечение инструментальными средствами, для эффективного анализа аппаратных и программных проблем, возникающих на удаленных ПТК из состава единой системы соответствующей УЕИП;
- обеспечения возможности удаленного администрирования объектовых ПТК из состава ЕИС (ЕИТКС), включая управление и контроль установки, обновления и выполнения программ;
- создание отчетов о работоспособности и производительности вычислительных ресурсов ЕИС (ЕИТКС).

13. Соблюдение принципа обеспечения ИБ при построении ЕИС (ЕИТКС) соответствующей УЕИП следует реализовать:

- (1) за счет привлечения специализированной организации в части обеспечения ИБ. Эта организация должна участвовать в процессе создания ЕИС (ЕИТКС) на всех ключевых этапах в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51583-2000 [9]. У специализированной организации должны быть все необходимые лицензии ФСБ России и ФСТЭК России для проведения работ по данному направлению, а также опыт работ по обеспечению ИБ при создании крупных территориально распределенных ИС;

- (2) за счет понимания важности данной работы по ИБ и всесторонней помощи на уровне заказчика ЕИС (ЕИТКС).

Существенным условием гарантированности соблюдения принципа обеспечения ИБ является и тот факт, что с учетом стратегического значения для России создания ЕИС (ЕИТКС) весь процесс построения данной системы находится под постоянным контролем уполномоченных организаций в части безопасности и технической защиты информации — ФСБ России и ФСТЭК России.

14. *Выполнение принципа экономической целесообразности и обоснованности финансовых затрат на развертывание и поддержание работоспособности и актуализации ЕИС (ЕИТКС)* оценивается сокращением затрат (единая система вместо многочисленных самостоятельных ИС), а также повышением качества информационной поддержки в сфере деятельности конкретной УЕИП. С другой стороны, указанный принцип обеспечивается сокращением затрат на развертывание и поддержание работоспособности и актуализации компонентов ЕИС (ЕИТКС) этой УЕИП путем типизации процессов, унификации решений и оптимизации состава данной системы.

15. *Соблюдение принципов преемственности, направленной эволюции и максимального использования вложенных инвестиций* следует считать обязательным при создании широкомасштабных, функционально сложных компонентов ЕИС (ЕИТКС) соответствующей УЕИП с длительным жизненным циклом, с обеспечением поэтапного создания очередями и дальнейшего развития и модернизации как компонентов и в целом данной системы, так и ИС (АИС), взаимодействующих с ней [6].

16. Заключая рассмотрение требований и предложений по системному подходу к ЕИС конкретной УЕИП и ее архитектуре, необходимо:

- (1) акцентировать внимание на особой значимости решения организационных вопросов при проектировании, создании и эксплуатации ЕИС (ЕИТКС) в течение ее жизненного цикла;
- (2) так же четко, пунктуально отслеживать соответствующие решения, планы и графики их выполнения.

Важное положение организационного плана: ЕИС (ЕИТКС) соответствующей УЕИП должна быть наделена правами координации, формирования и развития ИР в сфере своей деятельности и включения в ЕИП РФ своих ИР.

3 Заключение

Статья расширяет и конкретизирует системные подходы к формированию нормативно-технической базы в части требований к архитектурному построению ЕИС организаций — участников ЕИП РФ с учетом всех этапов жизненного цикла.

Предложены обобщенные требования к системам и базовые принципы разработки проектных решений по их созданию.

Определены необходимые свойства систем, направления их возможного развития, состав необходимого документационного обеспечения.

Показана необходимость соблюдения принципов преемственности, эволюционности, обеспечения ИБ при построении ЕИС, экономической целесообразности и обоснованности финансовых затрат на развертывание и поддержание работоспособности.

Сформулированы основные положения по использованию методов математического и натурного моделирования на всех этапах жизненного цикла ЕИС.

Подчеркнута особая значимость решения организационных вопросов при проектировании, создании и эксплуатации ЕИС (ЕИТКС) различных УЕИП на всех этапах жизненного цикла.

Предложенные в статье подходы могут стать методической основой при формировании нормативно-технической базы создания ЕИС различных УЕИП в части их архитектурного построения.

Литература

1. Зацаринный А. А., Киселев Э. В. Некоторые подходы к формированию нормативно-технической базы для создания единого информационного пространства России // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 4. С. 206–220.
2. Зацаринный А. А., Киселев Э. В. Некоторые подходы к формированию нормативно-технической базы единого информационного пространства России в части информационных ресурсов // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 1. С. 157–169.
3. Электронная Россия: Федеральная целевая программа. Последние изменения 2008 г.
4. Штрик А. А. Использование информационно-коммуникационных технологий для экономического развития и государственного управления в странах современного мира // Информационные технологии. Приложение, 2009. № 6. 32 с.
5. Штрик А. А. Электронные технологии в деятельности органов государственной власти России: анализ и перспективы развития // Информационные технологии. Приложение, 2009. № 10. 32 с.
6. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С., Козлов С. В. Некоторые вопросы проектирования информационно-телекоммуникационных систем. — М.: ИПИ РАН, 2010. 218 с.
7. Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. 235 с.
8. Стандарты на открытые системы серии ГОСТ Р ISO/IEC ТО 10000-99. Информационная технология. Основы и таксономия международных функциональных стандартов ВОС.
9. ГОСТ Р 51583-2000. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении.

10. Р 50.1.022-2000. Государственный профиль взаимосвязи открытых систем России. Информационная технология.
11. Информационные технологии. Руководство по проектированию профилей среды открытой системы (СОС) организации-пользователя: Рекомендации по стандартизации РФ Р 50.1.041-2002. Введены в действие с 1 января 2004 г.

Поступила в редакцию 16.07.15

REGARDING SOME APPROACHES TO CREATION OF THE REGULATORY AND TECHNICAL BASE CONCERNING REQUIREMENTS TO ARCHITECTURAL DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEMS OF RUSSIAN INFORMATION SPACE MEMBERS

A. A. Zatsarinny and E. V. Kiselev

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

Abstract: The article continues the topic about regulatory and technical base forming for creation of information systems of organizations which are members of the Russian Federation Unified Information Space (RF UIS). The article shows generalized requirements to systems including main principles of systems creation project development, systems necessary properties, necessary documentation, potential development of information systems, requirements to mathematics and natural modeling during systems creation and operation, requirements to automated management of systems working, providing of information security, rationality in finances of project during system roll-out, maintenance and upgrade, providing of continuity, directed evolution and efficient use of investments, emphasized value of organization problem solution during the lifecycle. Propositions of the article are oriented to practical using as a science and methodical base for creation of regulatory and science base of RF UIS members information systems development.

Keywords: Russian Federation Unified Information Space (RF UIS); RF UIS member organization; systemic approach; UIS member system architecture; secured information resources; centralization; integration; information security; telecommunication provision

DOI: 10.14357/08696527150311

References

1. Zatsarinny, A. A., and E. V. Kiselev. 2014. Nekotorye podkhody k formirovaniyu normativno-tehnicheskoy bazy dlya sozdaniya edinogo informatsionnogo prostranstva

- Rossii [Regarding some approaches to creation of regulatory and technical base for Russian Unified Informational Space creation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(4):206–220.
2. Zatsarinny, A. A., and E. V. Kiselev. 2015. Nekotorye podkhody k formirovaniyu normativno-tehnicheskoy bazy edinogo informatsionnogo prostranstva Rossii v chasti informatsionnykh resursov [Regarding some approaches to creation of regulatory and technical base of Russian Unified Informational Space in the field of information resources]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(1):157–169.
 3. Elektronnaya Rossiya: Federal'naya tselevaya programma. Poslednie izmeneniya 2008 g. [Electronic Russia. Federal objective program. Update of 2008].
 4. Shtrik, A. A. 2009. Ispol'zovanie informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologiy dlya ekonomicheskogo razvitiya i gosudarstvennogo upravleniya v stranakh sovremennoego mira [Information and telecommunication technology application to economic development and public administration of modern world countries]. *Informatsionnye Tekhnologii. Prilozhenie* [Appendix to Information Technologies]. Vol. 6. 32 p.
 5. Shtrik, A. A. 2009. Elektronnye tekhnologii v deyatel'nosti organov gosudarstvennoy vlasti Rossii: Analiz i perspektivy razvitiya [Electronic technologies in Russian authorities activities]. *Informatsionnye Tekhnologii. Prilozhenie* [Appendix to Information Technologies]. Vol. 10. 32 p.
 6. Zatsarinny, A. A., Y. S. Ionenkov, and S. V. Kozlov. 2010. *Nekotorye voprosy proektirovaniya informatsionno-telekommunikatsionnykh system* [Some issues of information and telecommunication system designing]. Moscow: IPI RAN. 218 p.
 7. Zatsarinny, A. A., and A. P. Shabanov. 2015. *Tekhnologiya informatsionnoy podderzhki deyatel'nosti organizatsionnykh sistem na osnove situatsionnykh centrov* [A technology of information support of organization systems activities based on situation centers]. Moscow: TORUS PRESS. 235 p.
 8. GOST R ISO/IEC TO 10000-99. Standarty na otkrytye sistemy. Informatsionnaya tekhnologiya. Osnovy i taksonomiya mezhdunarodnykh funktsional'nykh standartov VOS [Open system's standards. Information technology. Foundations and taxonomy of VOS international functional standards].
 9. GOST R 51583-2000. Zashchita informatsii. Poryadok sozdaniya avtomatizirovannykh sistem v zashchishchennom ispolnenii [Information security. An order of secured automated information systems creation].
 10. R 50.1.022-2000. Gosudarstvenny profil vzaimosvyazi otkrytykh sistem Rossii. Informatsionnaya tekhnologiya [A state profile of interconnection of Russian open systems. Information technology].
 11. RF R 50.1.041-2002. Actual from 01.01.2004. Rekomendatsii po standartizatsii. Informatsionnye tekhnologii. Rukovodstvo po proektirovaniyu profiley sredy otkrytoj sistemy (SOS) organizatsii-pol'zovatelya [Standartization recommendations. Information technologies. Guidance on design of user-organization open system environment profiles].

Received July 16, 2015

Contributors

Zatsarinny Alexander A. (b. 1951) — Doctor of Science in technology, professor, Deputy Director, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; azatsarinny@ipiran.ru

Kiselev Eduard V. (b. 1938) — senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; ekiselev@ipiran.ru

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕГРАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ДАННЫХ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

A. П. Сучков¹

Аннотация: Рассматриваются вопросы интеграции аналитических данных при создании интегрированных систем поддержки принятия решений (СППР). На конкретных примерах показана актуальность создания технологий обмена данными аналитики. На основе существующего зарубежного и отечественного опыта предложены подходы к структуре и способам формирования информационной модели аналитических данных в среде взаимодействия распределенной системы управления. Разработаны способы формализации аналитических данных с учетом всех составляющих контролируемого пространства распределенной системы управления, включая целевую обстановку, контролируемые объекты, контролируемые ресурсы, неконтролируемые факторы. При этом учитываются и пять стадий аналитической обработки данных: оценка параметров ненаблюдаемых (скрытых) элементов обстановки; оперативный анализ обстановки путем ее сравнения с прошедшим периодом; оценка ситуации с целью определения степени сложности ситуации — штатная, критическая, чрезвычайная; прогнозирование изменения обстановки и непосредственно поддержка процессов принятия управленческих решений. Приведено формализованное описание основных видов аналитических данных, позволяющее сформировать их XML-модель для двух уровней систем управления — стратегического и тактического

Ключевые слова: системы поддержки принятия решений; распределенная система управления; аналитические данные; информационная модель

DOI: 10.14357/08696527150312

1 Введение

Реализация планов создания национальной интеллектуальной аналитической платформы в интересах обороны, безопасности и охраны правопорядка нуждается в проведении исследований по совершенствованию технологий и инструментов управления большими организационно-техническими системами, разработке математических методов моделирования взаимодействующих систем, интеллектуализации СППР и др., соответствующих современным возможностям вычислительной техники. Важнейшим вопросом создания национальной интеллектуальной аналитической платформы является интеграция аналитических

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

данных существующих и вновь создаваемых систем принятия решений в данной предметной области.

Опыт разработки информационно-аналитических систем и ситуационных центров в области безопасности и правопорядка, накопленный в ИПИ РАН за последние годы [1–4], позволяет сформулировать базовые подходы к интеграции аналитических данных в среде взаимодействия национальной интеллектуальной аналитической платформы.

В статье рассматриваются информационные технологии интеграции аналитических данных в процессе информационно-аналитического взаимодействия автоматизированных систем управления.

2 Актуальность интеграции аналитических данных

Аналитические данные — информационный продукт, созданный на основе специально собранных и обработанных с помощью определенных методов исходных данных и характеризующий напрямую наблюдаемые закономерности, факторы, характеристики процессов контролируемого пространства, опираясь на который, можно принять результативные управленческие решения.

Что может дать интеграция аналитических данных? Во-первых, экономию ресурсов, затрачиваемых на проведение качественного анализа складывающейся обстановки на стратегическом и тактическом уровнях управления. Аналитические данные — ресурсоемкие продукты, и это связано с тем, что для их создания требуются разветвленные системы мониторинга и сбора исходных данных, большие затраты на создание аппаратно-программной среды и, наконец, требуется высококвалифицированный персонал. Аналитические данные являются во многом уникальными, и их многоспектное использование позволяет обеспечить снижение затрат и эффективность принятия решений как внутри системы управления, так и при взаимодействии между различными системами.

Во-вторых, интеграция систем управления на основе автоматизированного обмена данными аналитики обеспечивает повышение их информированности. В качестве примера можно привести анализ негативных трансграничных потоков.

Метод выборочного контроля, который основан на вполне определенных статистических методах, позволяет на основе ряда проверок случайно выбранных объектов из всего потока событий получить статистически достоверную оценку реально произошедших событий. Например, это могут быть процедуры пограничного контроля, позволяющие оценить реальные объемы негативных трансграничных потоков (наркотрафик, незаконная миграция, контрабанда). Оценка может также включать их распределение по участкам границы, их изменение во времени, что позволяет изучать тенденции и аномалии данных процессов (рис. 1).

Для этого примера характерно то, что результаты анализа порождаются на основе данных пограничной службы и могут использоваться для оценки эффективности мер противодействия, однако эти оценки реальных объемов проникновения негативных трансграничных потоков на территорию РФ, несомненно,

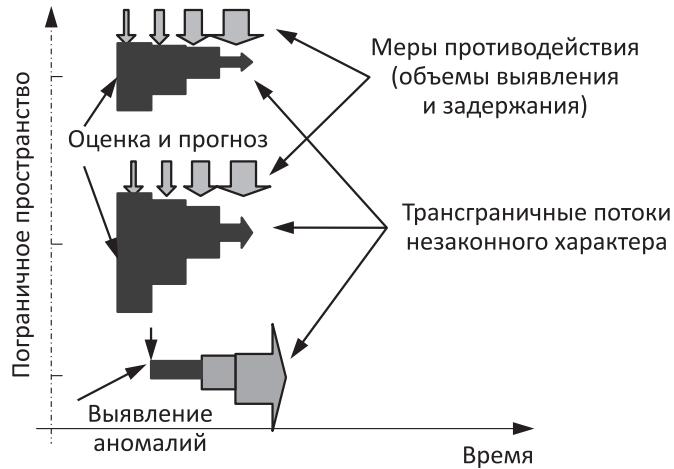


Рис. 1 Процесс контроля негативных трансграничных потоков

важны для информирования других ведомств: Федеральной службы по контролю за наркотиками; Федеральной миграционной службы, Федеральной таможенной службы, Министерства внутренних дел, Министерства здравоохранения.

Другой пример из этой области — анализ величины нелегального вывоза за рубеж дальневосточных морепродуктов. Предположим, своими средствами контроля пограничная служба зафиксировала нелегальный вывоз A тонн краба в Японию. Однако для получения реальных оценок требуется привлечение публикуемых Роскомстатом данных международной статистики о добывших в Японии в прошлом году B_1 тоннах краба и величине произведенной крабовой продукции — B_2 тонн ($B_2 > B_1$). С помощью несложных вычислений и экспертных оценок можно оценить величину B — количество ввезенного извне краба: $B = A + B_2 - B_1$.

Эти данные могут быть получены только путем интеграции аналитических данных различных ведомств: пограничных органов и центров анализа международной экономики.

В-третьих, интеграция данных аналитики из различных систем управления может приводить к синергизму экспертизных оценок. Действительно, данные, полученные в различных аналитических системах, можно трактовать как экспертные оценки в группе экспертов и, применяя различные методы обработки данных коллективных экспертных оценок, можно попытаться повысить объективность и качество аналитических материалов.

И, наконец, в-четвертых, интеграция взаимоувязанных аналитических центров и систем управления способствует созданию конкурентной среды. Наличие среды взаимодействия в области аналитики неизбежно приведет к развитию конкуренции в области аналитики, что может позволить оптимизировать струк-

туру и ресурсы аналитического сообщества. История его развития за рубежом показывает, что конкурентная среда способствует созданию специализированных и широкопрофильных центров аналитики, таких как корпорация РЭНД (США — оборонные вопросы), Объединенный информационный и ситуационный центр Германии (German Joint Information and Situation Centre — борьба с преступностью и терроризмом), Объединенный ситуационный центр Европейского Союза (The EU Joint Situation Centre — борьба с терроризмом).

3 Подходы к созданию единой информационной модели аналитических данных

Построение информационной модели среды взаимодействия информационно-аналитических систем такой сложной предметной области, как оборонная и правоохранительная сфера, — комплексная научно-техническая задача, решение которой должно осуществляться усилиями системных аналитиков, прикладных информационных технологов, экспертов-аналитиков предметной области.

Существует большой опыт в мировой практике в создании таких моделей, в частности опыт создания глобальной XML-модели данных правоохранительной сферы на базе интернет-технологий (GJXDM — Global Justice XML Data Model). Модель функционирует с сети Интернет с организационным центром в США и предназначена для стандартизации данных для обмена информацией внутри правоохранительного сообщества США и Европы. Модель поддерживается рабочей группой стандартов (ISWG — Interagency Sustainability Working Group).

Дальнейшее развитие глобальная модель GJXDM получила в последнее время в NIEM (National Information Exchange Model) — Национальной информационной XML-модели обмена данными в государственных органах США. Разработаны XML-модели следующих доменов:

- правоохранительная сфера (GJXDM);
- модели химического, биологического, радиологического и ядерного домена;
- биометрические схемы;
- управление в чрезвычайных ситуациях;
- иммиграция;
- защита инфраструктуры;
- разведка;
- морской домен и др.

Неотъемлемой частью моделей всех доменов является формализация аналитических данных, а именно:

- аналитическая оценка числовой характеристики;
- метод получения оценки;

- источник данных;
- достоверность (экспертная оценка, статистическая оценка).

В [2] обоснована структура информационной модели сложной предметной области, которая должна содержать следующие разделы:

- XML-модели, формализующие информационные объекты предметной области, их структуру, связи между ними;
- реестры объектов предметной области;
- классификаторы основных информационных объектов;
- тематические рубрикаторы;
- нормализованные иерархические словари терминов;
- линейные перечни терминов.

Для определения конкретного состава модели аналитических данных в среде взаимодействия национальной аналитической платформы необходимо структурировать два существующих измерения информационной модели — данные мониторинга обстановки и виды анализа данных мониторинга.

В [4] определены виды подлежащих анализу данных об обстановке в зоне ответственности системы управления:

- целевая обстановка (совокупность целевых состояний обстановки);
- контролируемые объекты (объекты, состояние которых подлежит контролю с точки зрения целей управления);
- контролируемые ресурсы (объекты управления, например свои или взаимодействующие ресурсы);
- неконтролируемые факторы, например противоборствующие ресурсы (силы, средства), элементы окружающей среды (природные, техногенные, социальные, политические и экономические факторы контролируемого пространства).

В этой же статье определены пять стадий (видов) анализа обстановки в системе управления:

- (1) оценка параметров ненаблюдаемых (скрытых) элементов обстановки на основе выборочных или косвенных данных по результатам мониторинга, выявление фактов;
- (2) оперативный анализ обстановки путем ее сравнения с прошедшим периодом (без изменений, хуже, лучше, аномалия) с целью выявления ситуаций, требующих немедленного реагирования;
- (3) оценка ситуации с целью определения необходимости выработки решений по ее нормализации и степени сложности ситуации — штатная, критическая, чрезвычайная;

- (4) прогнозирование изменения обстановки — без управляющего воздействия, с управляющим воздействием, сценарное прогнозирование с учетом внешних факторов;
- (5) поддержка процессов принятия управленческих решений — адаптация типовых решений и выработка нетиповых решений (с учетом прогнозирования).

Виды аналитических данных в среде взаимодействия аналитической платформы варьируются в зависимости от уровня управления и от применяемых методов анализа [5]. С точки зрения поддержки процессов государственного стратегического планирования решение задач управления связано с анализом массовых потоков событий по всем направлениям деятельности государства — политическому, экономическому, социальному, обеспечения национальной безопасности. Для анализа обстановки и поддержки процессов принятия решений на этих уровнях применяются математические методы статистического анализа потоков событий с целью создания динамических моделей процессов. На их основе осуществляется анализ текущего состояния, сравнительный анализ с прошлым периодом времени, выявление тенденций и аномалий в потоках событий, прогнозирование развития ситуаций и угроз, поддержка принятия решений.

На нижних (тактических) уровнях управления мониторинг контролируемого пространства осуществляется более детально, с учетом состояния конкретных контролируемых объектов и их взаимосвязей. Для анализа данных здесь применяются методы дискретной математики, связанные с теорией графов, математической логикой и лингвистическим анализом (рис. 2). Для нижнего уровня характерно использование информационно-расчетных задач, позволяющих про-

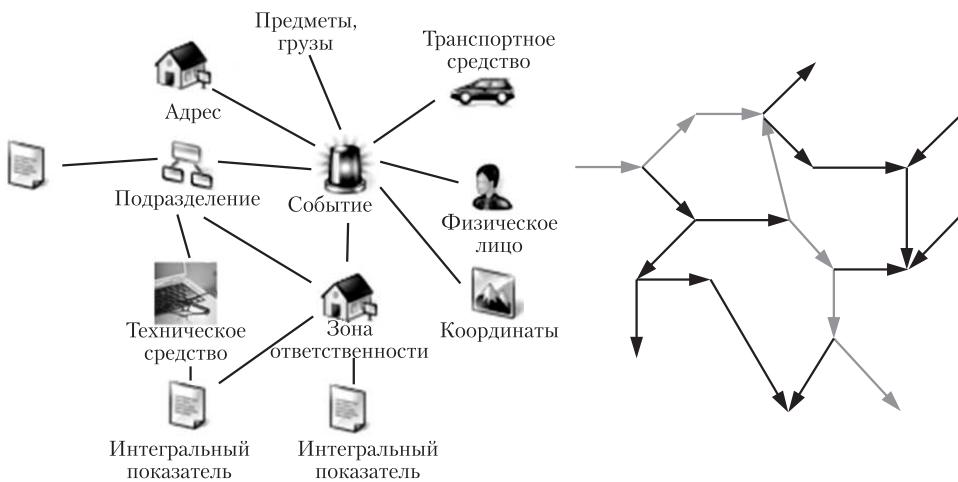


Рис. 2 Примеры визуализации методов дискретной математики

гнозировать и оценивать факторы, связанные с геопространственными задачами и оценками эффективности принимаемых решений.

На всех уровнях управления существуют системы мониторинга и интеграции разнородных данных, которые решают аналитические задачи по извлечению фактов и выявлению взаимосвязей между ними.

По поводу формализации данных мониторинга обстановки можно высказать следующие соображения. На стратегическом уровне управления применение математических методов анализа предполагает оцифровку изучаемых процессов [5]:

- основными показателями динамики изменения обстановки являются интегральные показатели, связанные с потоками происходящих событий;
- цели управления определяются целевыми показателями и их плановыми значениями, целевой показатель можно определить как функцию от набора интегральных показателей обстановки.

Организованные в виде временных рядов данные об обстановке позволяют применять различные виды статистического анализа и формировать формализованную отчетность по результатам анализа, т. е. аналитические данные.

В соответствии с приведенной структуризацией обстановки и стадиями ситуационного анализа можно определить ориентировочный состав элементов среды взаимодействия аналитической платформы и их группировку в зависимости от вида решаемой управленческой задачи [6] (табл. 1).

Таблица 1 Состав и группировка элементов среды взаимодействия для стратегического уровня управления

Обстановка: виды анализа	Элементы среды взаимодействия аналитической платформы						
	Целевая обстановка	Контролируемые объекты	Контролируемые ресурсы	Неконтролируемые факторы			
Оцифровка обстановки	Целевые показатели	Интегральные показатели					
Оценка скрытых элементов обстановки	Расчетный параметр	Оценка параметра					
Оперативный анализ обстановки	Ситуации						
Оценка ситуации	Оценка						
Прогнозирование изменения обстановки	Прогноз значения целевых показателей	Прогноз значения интегральных показателей					
Поддержка принятия управленческих решений	Сценарный прогноз, решение	Сценарный прогноз	Сценарный прогноз, инструкции	Сценарный прогноз			

Основными характеристиками фактографической модели обстановки для тактического уровня управления являются:

- сетевая организация данных об объектах и связях между ними;
- объектно-ориентированный подход при описании иерархии классов и наследовании свойств объектов;
- наличие компонент для идентификации и регистрации сложных объектов предметной области;
- специальная организация данных для осуществления аналитических работ.

Формализованные в виде семантических сетей данные мониторинга анализируются с использованием методов теории графов, математической логики и лингвистического анализа:

- выделение, идентификация и регистрация объектов;
- поиск подобных пространственно-временных конфигураций методами теории графов — изоморфное вложение графов;
- поиск прямых и ассоциативных связей (пути на графе);
- расчет интегральных и целевых показателей на графах.

В соответствии с приведенной структуризацией обстановки и видам дискретного анализа можно определить ориентировочный состав элементов среды взаимодействия аналитической платформы на тактическом уровне и их группировку в зависимости от вида решаемой управленческой задачи (табл. 2).

Таким образом, можно предположить, что для формирования XML-модели аналитических данных возможно применение следующих кортежей данных:

- для значений показателей: *⟨источник, дата, тип параметра (целевой, интегральный), название параметра, значение, единица измерения⟩*;
- для оценки параметра: *⟨источник, дата, название параметра, значение, единица измерения, доверительный интервал, вероятность⟩*;
- для оценки ситуации (изоморфное вложение подграфа): *⟨источник, дата, тип ситуации (штатная, чрезвычайная, критическая), вид ситуации (по классификатору), локализация (по классификатору)⟩*;
- для идентификации и оценки ситуаций: *⟨источник, дата, тип ситуации (штатная, чрезвычайная, критическая), вид ситуации (по классификатору), локализация (по классификатору)⟩*;
- для подграфа ситуации: *⟨источник, дата, матрица связности подграфа, тип ситуации (штатная, чрезвычайная, критическая), вид ситуации (по классификатору), локализация (по классификатору)⟩*;
- для обмена прогнозными данными: *⟨источник, дата, тип параметра (целевой, интегральный), название параметра, временной вектор, вектор значений, единица измерения, доверительный интервал, вероятность⟩*;

Таблица 2 Состав и группировка элементов среды взаимодействия для тактического уровня управления

Обстановка: виды анализа	Элементы среды взаимодействия аналитической платформы			
	Целевая обстановка	Контролируемые объекты	Контролируемые ресурсы	Неконтролируемые факторы
Оцифровка обстановки	Целевые показатели	Интегральные показатели		
Оценка скрытых элементов обстановки	Расчетный параметр	Оценка параметра		
Оперативный анализ обстановки		Подграф ситуации		
Оценка ситуации		Оценка (изоморфное вложение подграфа)		
Прогнозирование изменения обстановки	Прогноз значений целевых показателей	Прогноз значений интегральных показателей		
Поддержка принятия управленческих решений	Сценарный прогноз, решение	Сценарный прогноз	Сценарный прогноз, инструкции	Сценарный прогноз

- для обмена данными по сценарному прогнозированию: *источник, дата, тип параметра (целевой, интегральный), название параметра, сценарий (по классификатору), временной вектор, вектор значений, единица измерения, доверительный интервал, вероятность*;
- для передачи данных по решениям: *источник, дата, ситуация (регистрационный номер), действие (по классификатору), исполнитель, срок исполнения, название целевого параметра, плановое значение, единица измерения*.

Представление аналитических данных в среде взаимодействия, как видно из предлагаемой формализации, предполагает тщательную проработку вопросов классификации и стандартизации терминологии в рамках единого информационно-лингвистического обеспечения.

4 Заключение

1. Решение задачи создания национальной интеллектуальной аналитической платформы невозможно без определения путей интеграции разнородных аналитических данных, порождаемых в различных существующих и перспективных аналитических системах.
2. Интеграция аналитических данных требует проработки вопросов формирования адекватной информационной модели их представления для изучаемых предметных областей и всех уровней управления.

3. Наработан значимый научно-технический задел для создания национальной интеллектуальной аналитической платформы и назрел переход к реализации предлагаемых подходов в рамках конкретных научно-прикладных исследований и опытно-конструкторских работ.

Литература

1. Босов А. В., Сучков А. П. Об одном подходе к созданию информационно-аналитической подсистемы как составной части современных информационных систем // Информационные технологии управления информационными ресурсами двойного применения (IV): Препринт. — М.: ИПИ РАН, 2008. С. 31–42.
2. Сучков А. П. Ситуационный подход и информационная модель предметной области в правоохранительной сфере // Методы построения и технологии функционирования ситуационных центров. — М.: ИПИ РАН, 2011. С. 76–88.
3. Глазкова В. В., Курьин Р. В., Машечкин И. В., Петровский М. И., Сучков А. П. Методы анализа ситуационной информации // Методы построения и технологии функционирования ситуационных центров. — М.: ИПИ РАН, 2011. С. 136–149.
4. Сучков А. П. Аналитические аспекты мультиагентных распределенных систем управления // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 2. С. 166–177.
5. Сучков А. П. Два подхода к ситуационному анализу потоков событий // Ситуационные центры: фокус кросс-отраслевых интересов: Мат-лы II конф. — М.: РАНХиГС при Президенте РФ, 2012. <http://www.ситцентр.рф/archive/2012/obzor.html>.
6. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Некоторые подходы к ситуационному анализу потоков событий // Открытое образование, 2012. № 1. С. 39–45.

Поступила в редакцию 19.05.15

SOME APPROACHES TO ANALYTICAL DATA INTEGRATION OF EXISTING AND PROSPECTIVE DECISION SUPPORT SYSTEMS

A. P. Suchkov

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

Abstract: The article discusses the analytical data integration in the creation of integrated decision-making support systems. It shows examples of the relevance technology exchange data analysis. On the basis of the existing foreign and domestic experience, the article proposes approaches to the structure and methods of forming an information model of analytical data in the environment of the interaction of a distributed control system. The article develops the ways of formalizing the analytical data with all components of the control area distributed system management, including target setting, controlled objects, and resources controlled and uncontrolled factors. This includes five stages of analytical data: (i) estimation of parameters of unobserved (hidden) elements of the environment; (ii) operational analysis of the situation by comparing with the

previous period; (*iii*) to assess the situation to determine the degree of complexity of the situation — regular, critical, or emergency; (*iv*) forecasting changes in the environment; and (*v*) directly support the processes of managerial decision-making. Formalized description of the main types of analytical data makes it possible to generate their XML model for two levels of control systems — strategic and tactical.

Keywords: decision support; distributed control system; analytical data; information model

DOI: 10.14357/08696527150312

References

1. Bosov, A. V., and A. P. Suchkov. 2008. Ob odnom podkhode k sozdaniyu informatsionno-analiticheskoy podsistemy kak sostavnoy chasti sovremennoykh informatsionnykh sistem [About one approach to the creation of information and analytical subsystems as an integral part of modern information systems]. *Informatsionnye tekhnologii upravleniya informatsionnymi resursami dvoynogo primeneniya (IV)* [Information technology management of information resources is dual use (IV)]. Moscow: IPI RAN. 31–42.
2. Suchkov, A. P. 2011. Situationsionnyy podkhod i informatsionnaya model' predmetnoy oblasti v pravookhranitel'noy sfere [Situational approach and information model of the domain in the field of law enforcement]. *Metody postroeniya i tekhnologii funktsionirovaniya situatsionnykh tsentrov* [Methods of construction and technology of functioning of the situational centers]. Moscow: IPI RAN. 76–88.
3. Glazkova, V. V., R. V. Kurynin, I. V. Mashechkin, M. I. Petrovskij, and A. P. Suchkov. 2011. Metody analiza situatsionnoy informatsii [Methods of analysis of situational information]. *Metody postroeniya i tekhnologii funktsionirovaniya situatsionnykh tsentrov* [Methods of construction and technology of functioning of the situational centers]. Moscow: IPI RAN. 136–149.
4. Suchkov, A. P. 2014. Analiticheskie aspekty mul'tiagentnykh raspredelennykh sistem upravleniya [Analysis aspects of multiagent distributed control systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(2):166–177.
5. Suchkov, A. P. 2012. Dva podkhoda k situatsionnomu analizu potokov sobityi [Two approaches to situational analysis of event streams]. *Situatsionnye tsentry: Fokus kross-otraslevykh interesov. Materialy II konf.* [2nd Conference on Situational Centers: The Focus of Cross-Sectoral Interests Proceedings]. Available at: <http://www.ситцентр.рф/archive/2012/obzor.html>.
6. Zaccarinnyj, A. A., and A. P. Suchkov. 2012. Nekotorye podkhody k situatsionnomu analizu potokov sobityi [Some approaches to situational analysis of event streams]. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education] 1:39–45.

Received May 19, 2015

Contributor

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

НОРМАЛИЗОВАННЫЕ ДЕНЬГИ В СИСТЕМЕ ИМУЩЕСТВЕННЫХ СТАТУСОВ

В. Д. Ильин¹

Аннотация: Представлена часть методологии информатизации нормализованного экономического механизма (НЭМ). Информатизация рассматривается как усовершенствование документирования экономической деятельности на основе системы имущественных статусов. Элементарным документом в этой системе является уникальный глобальный счет участника экономической деятельности. Основное внимание сосредоточено на модели нормализованных денег в системе имущественных статусов. В связи с этой моделью кратко представлены нормализованная банковская система, долговая торговля, эмиссия и возврат долговых сумм.

Ключевые слова: нормализованные деньги; система имущественных статусов; нормализованный экономический механизм; долговая торговля

DOI: 10.14357/08696527150313

1 Введение

В условиях глобального разделения труда (с динамичным перемещением ресурсов и производств) репутацию наиболее адекватного продолжает сохранять *экономический механизм* (ЭМ), в котором имущественный обмен осуществляется по рыночным правилам.

Результаты экономической деятельности каждой страны зависят от структуры и правил функционирования ее ЭМ, способов реализации и контроля выполнения этих правил, технологий информационного обслуживания *участников экономической деятельности* (эд-участников), а также технологий документального отображения имущественных статусов эд-участников (физических и юридических лиц) и совершенных ими экономических сделок [1]. Нынешний экономический механизм России, служащий эд-участникам прежде всего инструментом получения экстерриториальной выгоды, не способствует хозяйствованию, ориентированному на повышение потенциала страны [2]. Его устройство не соответствует и современным организационным и технологическим возможностям информатизации экономической деятельности [1, 3].

Автор исходит из того, что комплексы научно-технических задач проектирования ЭМ и государственного механизма неразрывно связаны [2]. Оба механизма рассматриваются как организационное основание жизнестроительной системы

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

страны. Устройство этих механизмов и связи между ними должны изменяться в зависимости от того, что понимается под благоденствием страны и какие задачи экономического развития предстоит решить. При проектировании необходимо, конечно же, учитывать и связи с экономическими и государственными механизмами других стран.

1.1 Научно-исследовательская работа, результаты которой представлены в статье

Социально-экономическая роль и *s-модель¹ денег в эпоху интернет-сервисов*, реализация *системы имущественных статусов* и технологии товарно-денежного обращения *нормализованного экономического механизма* [1, 3, 5] — эти и другие вещи, рассматриваемые в статье, изучаются в рамках научно-исследовательской работы (НИР) «Создание методологии информатизации нормализованного экономического механизма и программная реализация комплекса экспертного планирования ресурсов на основе интернет-сервисов». Эта НИР выполняется в Институте проблем проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук. Основанием для ее проведения является государственное задание, полученное в составе научного проекта «Фундаментальные научные исследования в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы». Научно-техническим заданием на НИР установлено выполнение работ по созданию и апробации методологии информатизации НЭМ в течение 2015–2016 гг. Первая очередь средств информатизации НЭМ включает комплекс интернет-сервисов экспертного планирования ресурсов. В июне 2015 г. завершены работы по созданию теоретических основ методологии информатизации НЭМ и опубликованы методология, принципы реализации и описание применения *интернет-сервиса «Планирование расходов»* [6, 7]. Метод интервального планирования расходов, реализованный в этом интернет-сервисе (www.res-plan.ru), не имеет известных аналогов.

1.2 Выделение фрагментов текста статьи

Для выделения определений, замечаний и примеров используются следующие средства:

- ⟨фрагмент описания⟩ ≈ утверждение (определение, аксиома и др.) (здесь и далее символ ≈ заменяет слово «означает»);
- ⟨фрагмент описания⟩ ≈ замечание;
- ⟨фрагмент описания⟩ ≈ пример.

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

¹Здесь и далее префикс *s-* означает принадлежность понятия к методологии символьного моделирования произвольных объектов в человеко-машинной среде [4].

2 Подход к информатизации экономического механизма

Информатизация рассматривается как средство поэтапного перехода от действующего ЭМ к НЭМ (см. рисунок).

Нормализованный экономический механизм — это рыночный экономический механизм, комплексы которого функционируют на основе электронных сервисов [1, 3, 5–7]. Устройство и правила работы НЭМ, установленные государственными законами, стимулируют граждан вести хозяйственную деятельность, ориентированную на повышение экономического потенциала своей страны [2]. Делается это посредством налогов, пошлин и других экономических инструментов. В НЭМ не подавляется стремление эд-участников к получению экстерриториальной выгоды. Оно поддерживается во всех случаях, когда сделка (купли-продажи, инвестирования или др.) не противоречит решению задач повышения потенциала страны.

Нормализованный экономический механизм: основные комплексы	
Управление экономической деятельностью	Производство реальных товаров Торговля реальными товарами Резервирование жизненно-необходимых товаров Договорное денежное инвестирование Государственный бюджет, резервы, налоги и пошлины Региональные бюджеты и налоги Фонды социальной защиты Документирование экономической деятельности

Состав НЭМ: основные комплексы

3 Система имущественных статусов

Система имущественных статусов (ис-система) — программно реализуемая в s-среде [1] система документального представления денежной и неденежной составляющих имущественных статусов эд-участников. Денежная составляющая выражена значениями сумм нормализованных денег в разделах *уникальных глобальных счетов* эд-участников (ис-счетов). Неденежная — документами, подтверждающими право собственности на недвижимость, транспорт и другое имущество, которое при необходимости может рассматриваться как залоговое.

Ис-счет — унифицированный электронный документ, состоящий из *валютных частей* (активируемых банком-регулятором), каждая из которых имеет следующие основные разделы:

- «Располагаю»;
- «Кредитование»;
- «Инвестирование»;
- «Налоги и сборы»;

- «Дарение»;
- «Пожертвование».

В разделе «Располагаю» — сумма денег, которую можно использовать для любых допустимых сделок (купли товаров, инвестирования и др.). В разделе «Кредитование» — подразделы «Выдано» (сумма денег, выданных в кредит) и «Получено» (сумма заемных денег). В разделе «Инвестирование» — подразделы «Вложено» (сумма инвестированных денег) и «Получено» (сумма полученных инвестиций). Предусмотрены подразделы и в других разделах. Задав отрезок времени, можно получить детализацию по подразделам для любого раздела счета. Совокупность допустимых операций (при документировании сделок) определяется принадлежностью суммы к подразделу счета (\bigcirc сумма из подраздела «Получено» раздела «Инвестирование» может использоваться только для оплаты товаров, типы которых перечислены в инвестиционных договорах \bigcirc). \square

Поскольку ис-счет имеет *поливалютную структуру*, он применим для документирования результатов внутренней и внешней экономической деятельности.

Существование ис-счета предполагает, что его владелец имеет *的独特ный глобальный идентификатор* (\diamond 25.06.2010 в США опубликован концептуально близкий проект «National Strategy for Trusted Identities in Cyberspace» [8] \diamond).

3.1 Аксиома допустимости операций над ис-счетом

\square Никакое изменение сумм ис-счета не может быть осуществлено без *документируемого зашифрованного подтверждения владельца ис-счета* (а в неординарных ситуациях — после документируемого зашифрованного подтверждения определенного законом государственного органа). \square

В НЭМ это реализуется на программно-аппаратном уровне. Операция становится допустимой (при сделках купли-продажи, инвестирования и др.) только тогда, когда от владельца каждого ис-счета, вовлеченного в операцию, получено зашифрованное согласие. Каждое такое подтверждение входит в состав документа, отражающего операцию над ис-счетом. Документ получают владельцы ис-счетов; его копия хранится установленное время на серверах банков-провайдеров.

3.2 Государственное удостоверение операций над ис-счетами

Изменение состояния *ис-счета* может быть реализовано только после получения *государственного удостоверения допустимости операции* над ис-счетом. Удостоверение выдает специальный онлайн-сервис банка-регулятора. Основанием для получения удостоверения служат данные совершающей операции (сделка купли-продажи, договорного инвестирования или др.).

Таким способом исключаются возможности нарушения установленных законом правил товарно-денежного обращения (недопустимые экономические сделки, неуплата установленных законом государственных сборов и др.).

4 Нормализованные деньги

□ *Нормализованные деньги* — программно реализуемое в *s*-среде средство документального представления стоимости товаров и имущественных статусов эд-участников, а также средство оплаты товаров и накопления богатства. Нормализованные деньги представлены записями в ис-счетах, удостоверяющими имущественное право на долю стоимости товаров экономической системы и имущественные обязательства по отношению к другим эд-участникам, выраженные суммами долгов и полученных инвестиций. Для представления значений денежных величин используются вещественные числа с соответствующим знаком (минус — для сумм, которые предстоит вернуть; плюс — для сумм, полученных в соответствии с договорами совершенных сделок). □

Для нормализованных денег определены два состояния: «*назначенные*» (долг, образовавшийся при покупке товара; инвестиция; налог или другая сумма, которую необходимо заплатить) и «*неназначенные*» (суммы в разделах «Располагаю» ис-счетов). «Назначенные» деньги могут использоваться только по определенному назначению [○ полученные от инвесторов — в соответствии с инвестиционными договорами (закупка нового оборудования и т. д.) ○]. «Неназначенные» деньги используются по усмотрению владельца ис-счета (в любых допустимых сделках).

4.1 Товарная емкость денег

□ Предположим, что в некотором регионе экономической системы на A рублей можно купить $e[A]$ киловатт-часов электроэнергии или $w[A]$ литров питьевой воды. Величины $e[A]$ и $w[A]$ представляют региональную *товарную емкость денег* для электроэнергии и питьевой воды. □ В разных регионах системы товарная емкость денег по одному и тому же типу товара может существенно отличаться. В пределах системы целесообразно пользоваться одинаковым во всех регионах значением A (чтобы было удобнее сопоставлять региональные товарные емкости по выбранному типу товара).

Изменения во времени региональной товарной емкости денег (по типам товаров) отражают изменения соотношения спроса и предложения. ○ Если, пользуясь превышением спроса над предложением, цены поднимают производители определенного типа реальных товаров (без увеличения функциональности и качества этих товаров), то какое-то время такие производители будут в выигрыше (пока на рынке не будет достигнут баланс спроса и предложения). При этом производители, увеличившие цены, обычно теряют часть своих оптовых покупателей и в итоге могут уменьшить рыночную долю, принадлежащую их товарам. ○

Сведения об изменениях товарной емкости денег служат важными данными для производителей, продавцов и инвесторов: изменения по типам товаров целесообразно публиковать на соответствующих сайтах торговых и банковских порталов.

Постоянно действующими причинами уменьшения товарной емкости денег в экономических системах экстерриториальной выгоды являются денежные эмиссии и банковская торговля кредитами, не привязанными к сделкам купли-продажи реальных товаров. В результате на рынок выбрасываются суммы не обеспеченных товарами денег, что приводит к преобладанию платежеспособного спроса над предложением реальных товаров и в итоге — к росту цен. Уменьшение товарной емкости денег, по сути, представляет собой отъем части денежных средств у тех, кто производит и реализует реальные товары. Выгодно это «финансовым людям» и части государственных чиновников: первые при увеличении прибыли банков получают увеличенные зарплаты и бонусы, а вторые таким способом решают текущие «бюджетные проблемы». «Бюджетники» (учителя, врачи, военнослужащие и другие люди с фиксированными доходами) всегда теряют от уменьшения товарной емкости денег.

Теоретиками экономики экстерриториальной выгоды такое уменьшение объясняется как нечто неизбежное в рыночных условиях хозяйствования [9–11].

4.2 Средство представления стоимости товаров и денежной составляющей имущественного статуса

Рыночная стоимость товара — итог стоимостного компромисса продавца с покупателем, представленный некоторой суммой денег. Определяется соотношением спроса и предложения в конкретной рыночной ситуации.

Денежные накопления эд-участника отражены величинами в разделе «Располагаю» и подразделе «Вложено» раздела «Инвестирование» ис-счета. В разделе «Располагаю» записана сумма неназначенного накопления, а в подразделе «Вложено» раздела «Инвестирование» — сумма назначенного (инвестиционными договорами) накопления.

5 Нормализованная банковская система

Банковская система НЭМ включает персональные электронные банки физических лиц (ПЭБы), корпоративные электронные банки (КЭБы), банки-провайдеры и банк-регулятор, под управлением которого функционируют все другие банки.

5.1 Банк-регулятор

Банк-регулятор — государственное учреждение, управляющее функционированием банковской системы НЭМ.

Задачи банка-регулятора, реализуемые посредством онлайн-сервисов:

- выдача и отзыв лицензий на право банковской деятельности (владельцам ПЭБов, КЭБов и банков-провайдеров);
- активация и деактивация валютных частей ис-счетов;

- контроль выполнения правил банковской деятельности;
- анализ финансовой составляющей экономической деятельности и представление результатов в порядке, установленном законом;
- разработка, модификация и утверждение прошедших тестирование унифицированных форм банковских документов (включая ис-счета);
- контроль эффективности размещения средств *государственного денежного резерва, фондов государственной социальной защиты*, других государственных фондов и фондов с государственным участием. □

Банк-регулятор располагает сетью серверов, размещенных на территории страны, под юрисдикцией которой находится экономическая система.

5.2 Банки-провайдеры

□ *Банки-провайдеры* — коммерческие предприятия, учрежденные юридическими лицами (или объединениями юридических лиц, объединениями физических лиц, объединениями юридических и физических лиц), занимающимися производством товаров или их реализацией.

Онлайн-сервисы банка-провайдера предназначены для:

- обслуживания запросов владельцев ис-счетов, направляемых посредством ПЭБов и КЭБов при совершении сделок (включая запросы на удостоверение состояния ис-счетов партнеров по сделкам, направляемые с их разрешения);
- хранения и обновления зашифрованных копий ис-счетов клиентов банка-провайдера;
- анализа инвестиционных запросов клиентов (потенциальных инвесторов и получателей инвестиций); банки-провайдеры могут выполнять заказы получателей инвестиций на консолидацию заявок инвесторов, чтобы комплексировать заказанную сумму инвестиции;
- регистрации заключенных договоров (с контролем допустимости сделок) и ведения баз данных таких договоров;
- юридического сопровождения реализуемых сделок. □

В базах данных банков-провайдеров в зашифрованной форме хранятся копии документов по всем обслуженным сделкам (за период времени, установленный законом).

Банк-провайдер располагает объединенными в сеть серверами, предназначенными для обслуживания запросов от ПЭБов и КЭБов клиентов и взаимодействия с серверами банка-регулятора. Для устойчивого функционирования НЭМ целесообразно, чтобы учредителями банков-провайдеров были юридические и физические лица, занимающиеся производством, распределением и резервированием реальных товаров и имеющие для этого достаточные не только денежные, но и неденежные имущественные основания. Правила, определяющие процессы учреждения, функционирования и ликвидации банков-провайдеров, должны быть установлены законом.

5.3 Персональные и корпоративные электронные банки

Персональные и корпоративные электронные банки (как программно-аппаратные средства) — это, как правило, переносные *з-машины* (типа планшетов), наделенные функциями смартфонов. Корпоративные электронные банки могут быть реализованы и на основе стационарных *з-машин*. В ПЭБах и КЭБах в зашифрованной форме хранятся оригиналы ис-счетов и документов по сделкам. Комплекс программ мобильного банкинга — ядро приложений ПЭБа или КЭБа. Зашифрованная база данных ис-счета хранится в памяти устройства, а ее копия — на карте памяти. Программно реализуемые записи в файлах ис-счетов имеют право инициировать только владельцы ис-счетов, совершающие сделку. Запросы на обслуживание сделки (удостоверение состояния ис-счета и сохранение обновленной копии ис-счета) получают банки-провайдеры, сервисами которых пользуются совершающие сделку эд-участники.

6 Долговая торговля

Одна из неотложных мер нормализации экономического механизма — реализация *долговой торговли*, при которой отсроченная часть оплаты товара оформляется как долг покупателя продавцу (а не банку!). Неоплаченная часть стоимости товара оформляется как долг, график выплаты которого фиксируется в договоре. В этом же договоре указываются штрафные санкции за нарушение графика выплат долга и ненадлежащее качество проданного товара. При долговой торговле все выгоды и риски разделяют только продавец и покупатель, а стоимость кредита упакована в стоимость покупки.

6.1 Возврат долгов

В общем случае возврат долга покупателя продавцу определяется их документально оформленным договором.

Применительно к долгам, образовавшимся в результате продажи приоритетных жизненно-необходимых товаров, могут действовать правила досрочного возврата долгов продавцам из средств банка-регулятора. Эти правила определяются банком-регулятором и действуют применительно к продавцам товаров, входящих в утвержденный законом приоритетный список. Продавцам таких товаров долговая часть стоимости покупки может быть возвращена в относительно короткие сроки (намного раньше, чем это предусмотрено графиком возврата долга, отраженным в договоре купли-продажи). Делается это по запросам продавцов в *долговой отдел банка-регулятора*, направляемых с использованием соответствующего онлайн-сервиса. При положительном решении банк-регулятор переводит на ис-счет продавца сумму долга, а покупатель после этого выплачивает долг не продавцу, а долговому отделу банка-регулятора. О возможности такой схемы возврата долга покупатель извещается продавцом до реализации сделки купли-продажи.

Досрочным возвратом долгов продавцам приоритетных товаров банк-регулятор реализует текущую государственную программу поддержки производства и продажи таких товаров.

6.2 Долговая денежная эмиссия

Долговая денежная эмиссия выполняется банком-регулятором только тогда, когда сумма возвращенных покупателями долгов меньше очередной долговой суммы, запрошенной для возврата продавцу. Эмитируемая сумма равна разности запрошенной долговой суммы и суммы на счету долгового отдела.

Долговая денежная эмиссия служит средством *государственного регулирования общей суммы нормализованных денег в экономической системе*. Таким способом осуществляется государственное регулирование товарной емкости денег.

◊ Правила эмиссии долговых сумм исключают возможность эмиссии денежных сумм, не обеспеченных товарами. ◊

6.3 Стимулирование продаж товаров с оплатой в национальной валюте

На поливалютном рынке НЭМ долговая торговля служит средством, стимулирующим продажи приоритетных товаров с оплатой в национальной валюте: возможность в относительно короткие сроки получить долговую часть стоимости товаров существует у продавцов только тогда, когда продажи сделаны с оплатой в национальной валюте.

6.4 Долговая торговля как антиинфляционный инструмент

Долговая торговля делает необязательным применение нынешних банковских кредитов. Этот вид торговли является действенным антиинфляционным инструментом: *изменение общей суммы денег всегда строго связано с изменением общей стоимости товаров, проданных в экономической системе*.

На первом этапе нормализации банковской деятельности необходимо, чтобы банк-регулятор обязал нынешние банки предоставлять обслуживание долговых торговых счетов, в которых должны быть отражены операции оплаты долговых покупок.

7 Заключение

В системе имущественных статусов НЭМ нормализованные деньги используются как средство электронного документирования стоимости товаров, объемов имущественного права эд-участников и других экономических сущностей, связанных с имущественным обменом (оценок залогового имущества, величин долгов и прибыли, договорных денежных инвестиций, государственных сборов и др.).

Нормализованные деньги не являются товаром, подобным тому, который производит (посредством денежных эмиссий) нынешняя банковская система и которым она торгует (в форме кредитов).

Суммы нормализованных денег, хранящиеся на ис-счетах эд-участников, технологически невозможно использовать без санкции владельцев ис-счетов. Также невозможно использование нормализованных денег для незаконных сделок ввиду обязательного онлайн-удостоверения допустимости сделки сервисом банка-регулятора.

Технология нормализованного товарно-денежного обращения (включающая технологию долговой торговли) является эффективным антиинфляционным инструментом, так как значительное уменьшение товарной емкости денег возможно только при соответствующем уменьшении предложений товаров на рынке. Правила долговой денежной эмиссии и отмена торговли кредитами исключают возникновение денег, не обеспеченных реальными товарами, а также стимулируют производство приоритетных товаров и их продажу за национальную валюту.

Банк-регулятор и банки-провайдеры нормализованной экономической системы служат ядром системы документирования результатов экономической деятельности. Эта система обслуживает эд-участников по их запросам, выполняемым с помощью КЭБов и ПЭБов.

Подход к нормализации денежной системы разработан с учетом возможностей поэтапного изменения действующей денежной системы, реализуемого без потерь для производителей реальных товаров и государства.

Литература

1. Ильин А. В., Ильин В. Д. S-экономика: механизм хозяйствования в эпоху Интернета. — М.: ИПИ РАН, 2011. 105 с. https://smodeling.files.wordpress.com/2012/02/s-economics-2011_f-rus.pdf.
2. Ильин В. Д. Основания ситуационной информатизации. — М.: Наука, Физматлит, 1996. 180 с.
3. Ilyin A. V., Ilyin V. D. Informatization of normalized economic mechanism: E-services for resource planning // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 4. С. 246–260.
4. Ильин А. В., Ильин В. Д. Основы теории s-моделирования. — М.: ИПИ РАН, 2009. 143 с. <http://smodeling.files.wordpress.com/2010/01/basics-theory-sm-20092.pdf>.
5. Ilyin A. V., Ilyin V. D. Towards a normalized economic mechanism based on e-services // Agris on-line papers in economics and informatics, 2014. Vol. 6. No. 3. P. 39–49.
6. Ильин А. В. Экспертное планирование ресурсов. — М.: ИПИ РАН, 2013. 58 с. <https://smodeling.files.wordpress.com/2014/05/av-ilyin-epr-2013.pdf>.
7. Ильин А. В. Интернет-сервис планирования расходов // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 2. С. 111–122.

8. National Strategy for Trusted Identities in Cyberspace. Enhancing Online Choice, Efficiency, Security, and Privacy. — Washington, D.C., USA: The White House, 2011. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/rss_viewer/NSTICstrategy-041511.pdf.
9. Fisher I. The purchasing power of money. Its determination and relation to credit, interest, and crises. — New York, NY, USA: The Macmillan Co., 1922. <http://www.econlib.org/library/YPDBooks/Fisher/fshPPM.html>.
10. Keynes J. The general theory of employment, interest and money. — Macmillan Cambridge University Press, for Royal Economic Society, 1936. <http://www.marxists.org/reference/subject/economics/keynes/general-theory>.
11. Friedman M. The optimum quantity of money. — Revised ed. — AldineTransaction, 2005. 296 p.

Поступила в редакцию 09.08.15

NORMALIZED MONEY IN THE SYSTEM OF PROPERTY STATUSES

V. D. Ilyin

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

Abstract: The article presents a part of the methodology for informatization of the normalized economic mechanism. Informatization is considered as improvement of documenting economic activity on the basis of the system of property statuses. A basic document in this system is a unique global account of a participant of economic activity. The focus is on the model of normalized money in the system of property statuses. In connection with this model, the author briefly presents the normalized banking system, trading with direct lending, emission, and repayment of debt amounts.

Keywords: normalized money; system of property statuses; normalized economic mechanism; trading with direct lending

DOI: 10.14357/08696527150313

References

1. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2011. *S-ekonomika: Mekhanizm khozyaystvovaniya v epokhu interneta* [S-economics: Mechanism of management in the Internet epoch]. Moscow: Institute of Informatics Problems of RAS. 105 p. Available at: https://smodeling.files.wordpress.com/2012/02/s-economics-2011_f-rus.pdf (accessed August 9, 2015).

2. Ilyin, V. D. 1996. *Osnovaniya situatsionnoy informatizatsii* [Foundations of situational informatization]. Moscow: Nauka, Fizmatlit. 180 p.
3. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2014. Informatization of normalized economic mechanism: E-services for resource planning. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(4):246–260.
4. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2009. *Osnovy teorii s-modelirovaniya* [Basics of the theory of s-modeling]. Moscow: Institute of Informatics Problems of RAS. 143 p. Available at: <http://smodeling.files.wordpress.com/2010/01/basics-theory-sm-20092.pdf> (accessed August 9, 2015).
5. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2014. Towards a normalized economic mechanism based on e-services // Agris on-line Papers in Economics and Informatics 6(3):39–49.
6. Ilyin, A. V. 2013. *Ekspertnoe planirovanie resursov* [Expert resource planning]. Moscow: Institute of Informatics Problems of RAS. 58 p. Available at: <https://smodeling.files.wordpress.com/2014/05/av-ilyin-epr-2013.pdf> (accessed August 9, 2015).
7. Ilyin, A. V. 2015. Internet-servis planirovaniya raskhodov [The online service for cost planning]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(2):111–122.
8. USA, The White House. 2011. National Strategy for Trusted Identities in Cyberspace. Enhancing Online Choice, Efficiency, Security, and Privacy. Available at: http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/rss_viewer/NSTICstrategy_041511.pdf (accessed October 12, 2015).
9. Fisher, I. 1922. *The purchasing power of money. Its determination and relation to credit, interest, and crises*. New York, NY: The Macmillan Co. Available at: <http://www.econlib.org/library/YPDBooks/Fisher/fshPPM.html> (accessed August 9, 2015).
10. Keynes, J. 1936. *The general theory of employment, interest and money*. Macmillan Cambridge University Press, for Royal Economic Society. Available at: <http://www.marxists.org/reference/subject/economics/keynes/general-theory/> (accessed August 9, 2015).
11. Friedman, M. 2005. *The optimum quantity of money*. Revised ed. AldineTransaction. 296 p.

Received August 9, 2015

Contributor

Ilyin Vladimir D. (b. 1937) — Doctor of Science in technology, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; vdilyin@ipiran.ru

НОРМАТИВНЫЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Г. В. Лукьянов¹, Д. А. Никишин², Г. Ф. Веревкин³, В. В. Косарик⁴

Аннотация: Тематика статьи относится к нормативно-правовым и методологическим основам создания систем информационного мониторинга и индикаторного оценивания (СИМИО) в сфере национальной безопасности. Рассматриваются нормативно-правовые акты (НПА) и информационно-справочные документы в сфере разработки и функционирования таких систем. На основе действующей в Российской Федерации организации обеспечения национальной безопасности предлагается один из возможных вариантов укрупненной функциональной структуры СИМИО и перечень основных категорий ее данных. Приводится описание подсистем и функциональных блоков соответствующей информационной системы с акцентом на методологические основы мониторинга и оценки национальной безопасности.

Ключевые слова: национальная безопасность; стратегическое планирование; информационный мониторинг; индикаторное оценивание; информационные ресурсы; модель данных

DOI: 10.14357/08696527150314

1 Введение

Обеспечение национальной безопасности является приоритетной задачей государства, решение которой направлено на создание благоприятных условий для успешной реализации стратегических национальных интересов Российской Федерации [1, 2]. Актуальность и сложность этой задачи на современном этапе исторического развития определяются набирающей темпы глобализацией всех сфер международной жизни и появлением новых масштабных угроз и проблем.

Мониторинг национальной безопасности Российской Федерации (НБРФ), предотвращение угроз или сведение их к приемлемому минимуму достигаются

¹ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, gena-mslu@mail.ru

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, dmnik@a170.ipi.ac.ru

³ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, gennadij.verevkin2012@yandex.ru

⁴ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, valery_lek@mail.ru

через укрепление национальной обороны, государственной и общественной безопасности, обеспечение социальной стабильности, этнического и конфессионального согласия, повышение мобилизационного потенциала и рост национальной экономики. Описание факторов, влияющих на НБРФ, и методологических основ теории национальной безопасности достаточно широко представлено в работах [3–7], а также в предыдущих публикациях авторов [8, 9].

Учет факторов, влияющих на НБРФ, предполагает многоаспектный мониторинг, результатом которого должна служить обобщенная оценка (ОО) НБРФ. Эффективность мониторинга и оперативность получения исходных данных для индикаторного оценивания НБРФ достигаются во многом благодаря внедрению средств автоматизации, которые на практике реализуют теоретические подходы, созданные методы и разработанные алгоритмы. Применение автоматизированных информационных систем (АИС) позволяет обеспечить оперативную обработку значительных объемов исходных данных и верифицируемость значений индикаторов мониторинга и ОО НБРФ.

Данная статья посвящена описанию нормативных и отдельных методологических аспектов создания СИМИО в сфере НБРФ, включая структурную схему организации мониторинга, методы индикаторного оценивания и получения ОО НБРФ. Предлагается один из возможных вариантов структурной схемы организации мониторинга и модели ее данных. По своей сути СИМИО предназначена для поддержки принятия решений в сфере государственного стратегического планирования.

2 Мониторинг как информационная платформа системы стратегического планирования

Информационный мониторинг НБРФ является неотъемлемой составляющей системы стратегического планирования в Российской Федерации, которая определяется как деятельность федеральных органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации и иных участников процесса государственного стратегического планирования по прогнозированию социально-экономического развития (СЭР), программно-целевому планированию и стратегическому контролю. Она направлена на повышение уровня СЭР Российской Федерации, рост благосостояния граждан и обеспечение НБРФ. Согласно № 172-ФЗ [2] стратегическое планирование включает в себя:

- планирование СЭР;
- обеспечение национальной безопасности.

В обоих случаях стратегическое планирование базируется на разработке научно обоснованных предложений о направлениях СЭР Российской Федерации, субъектов Российской Федерации и ожидаемых результатах развития. На основе этих предложений определяются показатели СЭР и НБРФ. По значениям этих

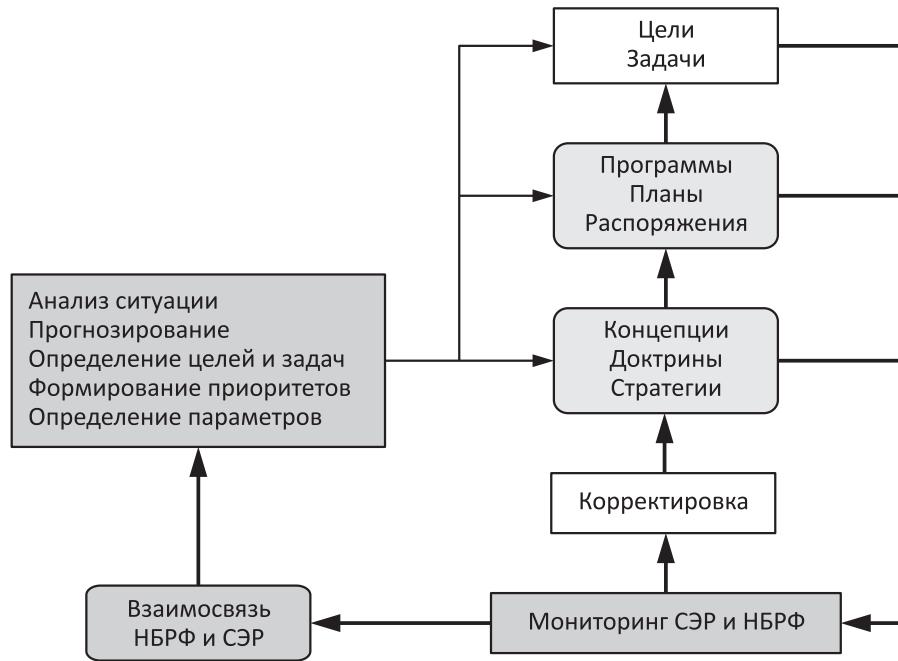


Рис. 1 Мониторинг и стратегическое планирование

показателей определяется степень реализации целей СЭР страны [1]. В свою очередь, разработка научно обоснованных предложений и определение ожидаемых (плановых) значений показателей СЭР Российской Федерации становятся возможными лишь благодаря многоаспектному, оперативному и достоверному мониторингу СЭР и НБРФ.

Таким образом, информационный мониторинг НБРФ обеспечивает исходными данными практически всю деятельность по государственному стратегическому планированию в Российской Федерации, что иллюстрирует рис. 1.

Более того, реализованная функциональность СИМИО во многом будет определять качество и эффективность стратегического планирования, так как она даст возможность лицам, принимающим решения (ЛПР), определять и верифицировать степень реализации положений стратегического планирования, а также оценивать эффективность всей системы государственного стратегического планирования.

Предлагаемое позиционирование СИМИО предполагает, что мониторинг НБРФ осуществляется на федеральном и региональном уровнях. Иначе говоря, в целях обеспечения эффективности функционирования системы государственного стратегического планирования предполагается, что оптимально формировать

единую информационную систему, содержащую сведения о концепциях, прогнозах, стратегиях и программах СЭР и Российской Федерации в целом, и ее субъектов, а также включающую данные обо всех показателях, характеризующих степень достижения программных целей и решения поставленных задач в сфере государственного стратегического планирования.

Предполагается, что основой разработки СИМИО должны стать следующие концептуальные документы:

- прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на долгосрочный (среднесрочный) период;
- прогноз СЭР Российской Федерации на долгосрочный (среднесрочный) период;
- прогнозы СЭР субъектов Российской Федерации на среднесрочный период;
- концепция долгосрочного СЭР Российской Федерации;
- долгосрочная бюджетная стратегия Российской Федерации;
- отраслевые документы стратегического планирования на долгосрочный период;
- стратегии СЭР федеральных округов и отдельных территорий;
- государственные программы Российской Федерации;
- федеральные целевые программы;
- основные направления деятельности Правительства Российской Федерации на среднесрочный период;
- стратегии СЭР субъектов Российской Федерации на долгосрочную перспективу;
- программы СЭР субъектов Российской Федерации на среднесрочный период;
- государственные программы субъектов Российской Федерации.

Наличие перечисленных концептуальных и плановых документов является нормативно-правовой основой программно-целевого управления, информационного мониторинга и индикаторного оценивания СЭР страны и НБРФ.

3 Структурная схема информационного мониторинга и индикаторного оценивания национальной безопасности Российской Федерации

Предлагаемый вариант структурной схемы СИМИО НБРФ основан на идее построения единой АИС, основной задачей которой является информационный мониторинг и индикаторное оценивание НБРФ с целью получения ОО НБРФ (рис. 2).

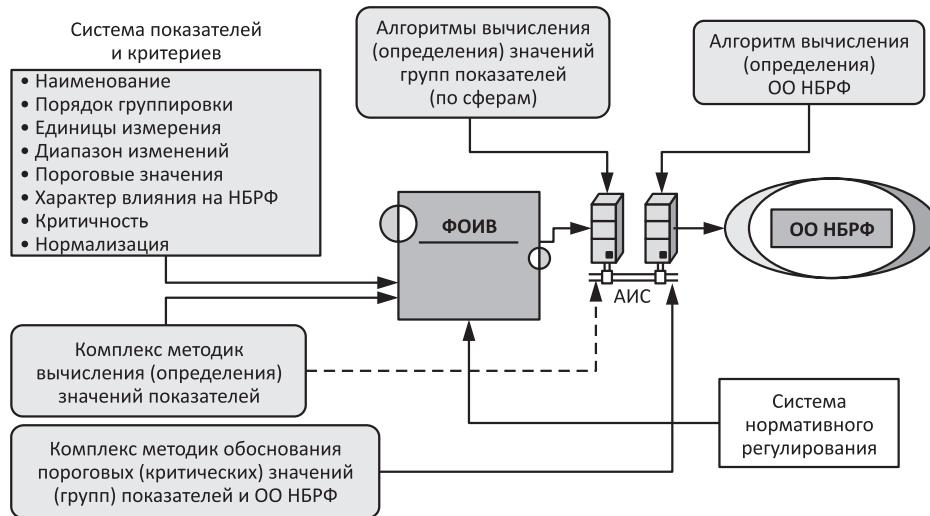


Рис. 2 Структурная схема организации мониторинга и индикаторного оценивания НБРФ

Как видно из рис. 2, в структурной схеме отражены следующие компоненты СИМИО НБРФ:

1. Система показателей, индикаторов и критериев¹ оценки НБРФ, включающая:
 - их наименования, описание исходных данных для определения их значений и методов верификации и экспертного оценивания исходных данных;
 - комплекс методик их группировки, дифференциации, интеграции или обобщения;
 - единицы измерения;
 - принципы и методы нормализации данных в системе;
 - критичность показателей (степень их важности в процессе получения ОО НБРФ).
 - характер влияния на НБРФ² как самих показателей (индикаторов), так и оценок, вычисленных на основе значений;

¹Под термином «критерий» подразумевается условие отнесения значений показателей и индикаторов к той или иной категории по числовой или номинативной шкале, например: «соответствует – не соответствует», «хороший, удовлетворительный, катастрофический» [3].

²Эта характеристика указывает на положительное или негативное влияние значения показателя (увеличение или уменьшение) на динамику состояния НБРФ, она необходима для учета в алгоритмах вычисления как обобщенных значений показателей, так и обобщающей оценки НБРФ. Например, рост производительности труда оказывает положительное влияние на НБРФ, а увеличение децильного коэффициента — негативное.

- возможные диапазоны вариации значений;
 - пороговые (критические) значения.
2. Федеральные органы исполнительной власти (ФОИВ), ответственные за вычисление (определение) значений показателей и индикаторов.
 3. Комплекс методик, методов и алгоритмов определения, верификации и экспертизы полученных значений показателей, индикаторов и ОО НБРФ.
 4. Комплекс методик для определения пороговых (критических) значений показателей, индикаторов и ОО НБРФ.
 5. Система нормативного регулирования деятельности по оценке НБРФ.

Таким образом, предлагаемый вариант структурной схемы СИМИО НБРФ состоит из компонентов, необходимых для получения ОО НБРФ.

В функциональном отношении в СИМИО НБРФ могут быть выделены как минимум следующие подсистемы:

1. Подсистема импорта, верификации и экспертного оценивания исходных данных информационного мониторинга.
2. Подсистема определения значений показателей, индикаторов, критериев и ОО НБРФ (далее — подсистема оценивания).
3. Подсистема ведения нормативных файлов, справочников, классификаторов и словаря показателей, индикаторов, критериев и ОО (далее — словарь ОО).
4. Подсистема администрирования прав пользователей системы.

Подсистема импорта и экспертизы данных

Подсистема импорта и экспертизы данных обеспечивает преобразование входных (первичных) данных из того вида, в котором они поступают в СИМИО НБРФ из внешних источников (в виде электронных таблиц или текстовых документов, а также в иных форматах представления результатов выполнения запросов к внешним ресурсам или базам данных (БД)), приводя их в соответствие со структурой и форматами представления данных в системе.

Макет СИМИО НБРФ включает в себя БД, обеспечивающую хранение упомянутых выше исходных документов и БД результатов их преобразования к виду, соответствующему внутренней структуре данных СИМИО. В функциональном отношении эта подсистема предназначена для решения следующих задач:

- выполнение запросов к внешним источникам данных;
- верификация (формально-логический контроль — ФЛК) данных, поступающих на первичную обработку (в результате ФЛК информация может быть принята на обработку или отклонена с указанием причины отклонения);

- экспертное оценивание данных, поступающих на первичную обработку;
- преобразование принятой на первичную обработку информации в форматы БД СИМИО НБРФ.

После преобразования принятой на первичную обработку информации она загружается в БД СИМИО НБРФ и выполняется решение следующих задач:

- определяется степень полноты принятой на первичную обработку информации с точки зрения решения задач индикаторного оценивания и получения ОО НБРФ;
- в зависимости от степени полноты принятой на первичную обработку информации выбираются методики группировки, дифференциации, интеграции или обобщения индикаторов и показателей в пределах утвержденного комплекса методик;
- определяются формы визуализации (графического отображения) данных индикаторного оценивания;
- формируется задание на определение значений показателей, индикаторов и ОО.

Каждое действие, выполненное в подсистеме импорта и экспертизы данных, регистрируется в ее журнале.

Подсистема оценивания и нормативная подсистема

В функциональном отношении подсистема оценивания отвечает за определение значений показателей, индикаторов, критериев и ОО НБРФ. Нормативная подсистема отвечает за создание и редактирование описаний показателей, индикаторов, критериев и ОО НБРФ согласно действующим НПА. Эта подсистема включает в себя:

- классификатор административно-территориальных единиц Российской Федерации¹;
- классификатор временных периодов²;
- классификатор единиц измерения, в которых могут выражаться численные оценочные данные³;

¹Например, в соответствии с Общероссийским классификатором объектов административно-территориального деления ОК 019-95 (ОКАТО) и Общероссийским классификатором стран мира (ОКСМ) ОК (МК (ИСО 3166) 004-97) 025-2001, а также ГОСТом 7.67-2003 «Коды для представления названий стран» и аутентичным ему ISO 3166-88, устанавливающими буквенные и цифровые обозначения названий стран в кодированной форме, единые для различных систем обработки информации, ее хранения и обмена.

²Перечисляющий все задействованные в системе временные периоды таких стандартных периодов, как месяц, квартал, год и т. п.

³Представленные, например, в соответствии с Общероссийским классификатором единиц измерения (ОКЕИ) ОК 015-94 (МК 002-97).

- классификаторы семантических (смысловых) значений, каждый из которых представляет собой таблицу сопоставления численным значениям оценок индикаторов определенных качественных номинативных значений по заданным шкалам¹.

Исходной информацией для подсистемы оценивания служат задания на определение значений показателей, индикаторов, критериев и ОО НБРФ, а также данные подсистемы ведения нормативных файлов, справочников, классификаторов и словаря ОО (далее — нормативная подсистема). Подсистема оценивания обеспечивает основную функциональность СИМИО НБРФ — определение значений показателей, индикаторов, критериев и ОО. Их взаимосвязи задаются в нормативной подсистеме с помощью словаря ОО согласно действующим НПА, но эти взаимосвязи могут изменяться путем внесения поправок в эти документы. Наличие словаря ОО дает возможность не только оперативно учитывать вносимые изменения, но и проводить экспертизу сделанных предложений до внесения поправок в НПА, содержащие описания показателей, индикаторов, критериев, ОО НБРФ и взаимосвязей между ними.

Важно отметить, что этот словарь, первоначально разработанный для мониторинга программно-целевой деятельности в сфере науки [10, 11], является темпоральным, т. е. в нем хранятся все вносимые утвержденные и предлагаемые (тестовые) изменения с указанием моментов времени их внесения и их статуса (утвержденное или тестовое). Это дает возможность коллективам экспертов заранее опробовать и сопоставить разные варианты описаний показателей, индикаторов, критериев и ОО НБРФ и взаимосвязей между ними до утверждения поправок, вносимых в соответствующие НПА.

Описание индикатора в словаре ОО включает в себя спецификацию исходных данных и метода определения его значений на их основе.

Еще одной функцией темпорального словаря ОО является обеспечение процесса описания индивидуальных экспертных подходов и выработка общих согласованных решений в процессе сопоставления разных вариантов описаний показателей, индикаторов, критериев и ОО НБРФ и взаимосвязей между ними. В словаре фиксируются не только разные утвержденные и тестовые варианты описаний, но и степень согласованности каждого тестового варианта. Это дает возможность зафиксировать динамику процесса согласования и явно зафиксировать различия в экспертных подходах и их обоснования. Явное и структурированное описание различий в словаре ОО помогает анализировать, как правило в табличной форме, и сопоставлять индивидуальные экспертные подходы и вырабатывать общие согласованные описания показателей, индикаторов, критериев и ОО НБРФ и взаимосвязей между ними. Иначе говоря, словарь ОО помогает рациональной организации коллективной работы экспертов в сфере НБРФ.

Вопросы формирования коллективов разработчиков (авторов) индикаторов и экспертов в сфере НБРФ заслуживают отдельного рассмотрения и выходят за

¹Например, 0%–35% — «низко», 35%–65% — «средне», 65%–100% — «высоко» и т. п.

рамки этой статьи. Отметим только, что для согласования описаний показателей, индикаторов, критериев и ОО НБРФ и взаимосвязей между ними требуются эксперты, имеющие в совокупности знания и опыт в широком спектре предметных областей [12, 13].

Подсистема администрирования прав пользователей

Подсистема администрирования прав пользователей включает профили пользователей системы; их права на осуществление тех или иных действий определяются привязкой к следующим группам с указанными ниже правами:

- наблюдатель — только просмотр информации в системе. Это является базовым правом любого пользователя;
- автор — создание новых индикаторов (от своего имени), приглашение других пользователей системы, имеющих права эксперта, к согласованию созданного им индикатора, а также редактирование описаний тех индикаторов, в которых он фигурирует в качестве автора;
- эксперт — экспертное оценивание данных, поступающих на первичную обработку, и согласование индикаторов (посредством обсуждения и последующего голосования за тот или иной разработанный индикатор);
- ЛПР — формирование коллективов разработчиков (авторов) индикаторов и экспертов в сфере НБРФ, утверждение метода определения значений индикатора и процедуры его применения в СИМИО или исключения из системы;
- оператор подсистемы импорта данных — добавление вновь поступающей информации из внешних источников и верификация данных, поступающих на первичную обработку;
- администратор подсистемы нормативных классификаторов — актуализация классификаторов в соответствии с текущими законодательными изменениями (в основном это касается изменений в административно-территориальном устройстве РФ);
- администратор прав пользователей — регистрация пользователей, включение или исключение их из групп;
- администратор функционирования системы — настройка и запуск различных функциональных процессов в системе, в частности процесса вычислений;
- администратор данных — репликация и резервирование БД, выполнение ее настройки, оптимизации и т. п.;
- разработчик системы («суперадминистратор») — изменение структуры БД и функциональных модулей системы, а также самой модели данных и алгоритмов функциональных модулей, необходимых в процессе сопровождения и модернизации системы.

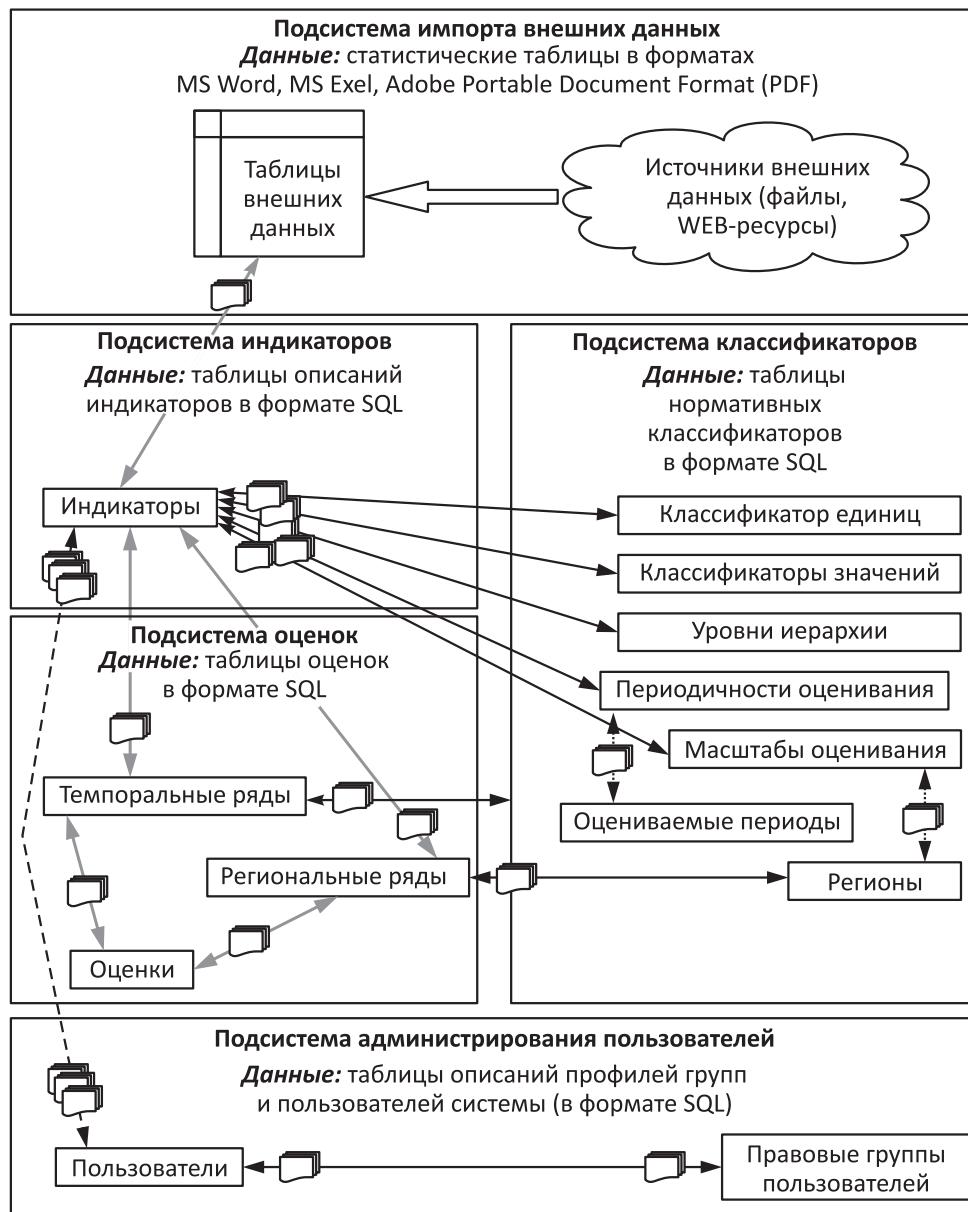


Рис. 3 Основные категории данных, с которыми работают группы пользователей

Основные категории данных, с которыми работают перечисленные группы пользователей, показаны на рис. 3.

4 Нормативно-правовые акты и информационно-справочные документы

Решающим фактором для достижения целей автоматизации информационного мониторинга и индикаторного оценивания НБРФ являются исходные информационные ресурсы [7, 14]. При разработке методологии мониторинга действующие НПА и информационно-справочные документы являются основой для решения вопроса о степени полноты тех информационных ресурсов, на основе которых определяются значения индикаторов и ОО НБРФ. От степени их соответствия перечню индикаторов и их полноты зависит реализуемость того или иного варианта концепции автоматизации и предлагаемой методологии информационного мониторинга и индикаторного оценивания.

Действующие НПА и информационно-справочные документы можно условно разделить на следующие три основные группы:

- (1) законодательные и другие нормативно-правовые акты;
- (2) программы, планы, распоряжения, поручения;
- (3) справочно-информационные документы.

Законодательные и другие нормативно-правовые акты являются основой для разработки методологии мониторинга, определения перечня показателей НБРФ, их классификации и группировки, а также для формирования конкретных методик вычисления индикаторов, других показателей и получения ОО НБРФ. Нормативной основой разработки методологических аспектов организации информационного мониторинга национальной безопасности являются следующие документы:

- Конституция Российской Федерации;
- Федеральный закон «О безопасности» от 28.12.2010 № 390-ФЗ;
- Федеральный закон «О государственном материальном резерве» от 29.12.1994 № 79-ФЗ;
- Федеральный закон «Об обороне» от 31.05.1996 № 61-ФЗ;
- Федеральный закон «О гражданской обороне» от 28.01.1998 № 28-ФЗ;
- Закон Российской Федерации «О государственной тайне» от 21.09.1993 № 5485-1;
- Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ;
- Доктрина информационной безопасности Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 09.09.2000 № Пр-1895;

- Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 30.01.2010 № 120;
- Военная доктрина Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 25.12.2014 № Пр-2976;
- Концепция долгосрочного СЭР Российской Федерации на период до 2020 г., утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.11.2008 № 1662-р;
- Стратегия НБРФ до 2020 г., утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 12.05.2009 № 537;
- Государственная программа Российской Федерации «Информационное общество (2011–2020)», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.10.2010 № 1815-р.

Комплекс документов, включающий планы, программы, распоряжения и поучения определяет способы достижения сформулированных в НПА целей в сфере НБРФ. В данном случае речь идет о планирующих и организационно-распорядительных документах федерального и регионального уровней.

Информационно-справочные документы применяются преимущественно для разработки методик определения значений показателей, выбранных для информационного мониторинга и индикаторного оценивания НБРФ. С этой целью рассматривались и анализировались следующие информационные ресурсы:

- сайт федеральной службы государственной статистики (<http://www.gks.ru>), который содержит массивы документов статистических данных за период с 2004 по 2014 гг.;
- сайт независимого института социальной политики (<http://www.socpol.ru>), который содержит массивы документов, в совокупности называемых «Социальный атлас российских регионов. Регионы России. Социально-экономические показатели 2013 года».

Анализ перечисленных НПА и информационных ресурсов позволяет определить направления информационного мониторинга и помогает разрабатывать методики определения значений индикаторов и других показателей. В частности, законодательные и нормативно-правовые акты определяют следующие направления оценивания НБРФ:

- уровень доходов населения страны;
- стандарты личной безопасности;
- доступность услуг образования и здравоохранения требуемого качества;
- обеспеченность жильем;
- доступ к культурным благам;
- обеспечение экологической безопасности;

- степень социального расслоения;
- степень региональной дифференциации;
- степень защиты интересов Российской Федерации от внешних и внутренних военных угроз и возможности вооруженных сил страны по противодействию этим угрозам.

Опираясь на эти заданные направления, можно использовать уже существующие традиционные индикаторы и показатели, например:

- уровень безработицы (доля от экономически активного населения);
- децильный коэффициент (соотношение доходов 10% наиболее и 10% наименее обеспеченного населения);
- уровень роста потребительских цен;
- уровень государственного внешнего и внутреннего долга (в процентном отношении от валового внутреннего продукта);
- уровень обеспеченности ресурсами здравоохранения, культуры, образования и науки (в процентном отношении от валового внутреннего продукта);
- уровень ежегодного обновления вооружения, военной и специальной техники;
- уровень обеспеченности военными и инженерно-техническими кадрами.

Распределение численности населения Российской Федерации по полу и возрастным группам на 1 января 2012 г. (тыс. чел.; М — мужчины, Ж — женщины)

Возраст, лет	Все население			Городское население			Сельское население		
	Всего	М	Ж	Всего	М	Ж	Всего	М	Ж
Все население	143 056	66 176	76 880	105 742	48 323	57 419	37 314	17 853	19 461
в том числе									
в возрасте:									
< 1	1786	917	869	1258	646	612	528	271	257
1–4	6594	3381	3213	4632	2377	2255	1962	1004	958
5–9	7261	3716	3545	5127	2625	2502	2134	1091	1043
10–14	6567	3365	3202	4526	2318	2208	2041	1047	994
15–19	7631	3895	3736	5575	2820	2755	2056	1075	981
20–24	11 599	5897	5702	8871	4450	4421	2728	1447	1281
25–29	12 328	6197	6131	9447	4695	4752	2881	1502	1379
30–34	11 116	5519	5597	8574	4219	4355	2542	1300	1242
35–39	10 380	5069	5311	7928	3837	4091	2452	1232	1220
40–44	9 340	4535	4805	6958	3339	3619	2382	1196	1186
45–49	10 023	4740	5283	7280	3372	3908	2743	1368	1375
50–54	11 560	5303	6257	8392	3740	4652	3168	1563	1605
55–59	10 215	4437	5778	7536	3179	4357	2679	1258	1421
60–64	8 380	3463	4917	6338	2554	3784	2042	909	1133
65–69	3 896	1 486	2 410	2 976	1 123	1 853	920	363	557
≥ 70	14 380	4 256	10 124	10 324	3 029	7 295	4 056	1 227	2 829

Большая часть этих показателей, особенно применительно к социально-экономической сфере, приведена на указанных сайтах, что позволяет оперативно получать их значения в ретроспективе в целом по стране и по регионам. При этом в подавляющем большинстве случаев они представлены в табличной форме и поэтому достаточно просто реализовать автоматизированный импорт их значений (см. пример в таблице).

5 Заключение

Рассмотренные в статье нормативные и методологические аспекты организации информационного мониторинга национальной безопасности представляют собой результат, полученный в рамках НИР «Эксперт», выполняемой в ФИЦ ИУ РАН. В результате проведенных исследований был предложен ряд методологических решений, ориентированных на автоматизацию процедур информационного мониторинга и индикаторного оценивания НБРФ, предназначенных для поддержки принятия решений в этой сфере.

Основной целью информационного мониторинга и индикаторного оценивания НБРФ является автоматизированное определение значений индикаторов и ОО НБРФ. Принципиальная особенность предлагаемых методологических решений заключается в возможности коллективного создания, согласования и экспертизы индикаторов на основе словаря ОО. При этом индикаторам разных аспектов национальной безопасности могут быть присвоены разные весовые коэффициенты, отражающие текущие приоритеты и степени угроз НБРФ.

Самую большую трудность при разработке методологии информационного мониторинга и индикаторного оценивания НБРФ представляют качественные показатели со значениями на номинативных шкалах. С одной стороны, они дают возможность учитывать качественные экспертные оценки. С другой стороны, затрудняют их учет в процессе формирования обобщенной оценки НБРФ.

Литература

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.11.2008 № 1662-р.
2. О стратегическом планировании в Российской Федерации: Федеральный закон Российской Федерации от 28 июня 2014 года № 172-ФЗ.
3. Телемтаев М. М. Государственное системное управление (системная философия государственной деятельности). — Алматы: Инфопресс, 2002. 405 с.
4. Национальная безопасность России в оценках экспертов: Аналитический отчет по результатам экспертного опроса (версия 2.4 от 28.0.2011). — М.: ИС РАН, ЦИРКОН, 2010. 56 с.
5. Проблемы стратегического государственного планирования и управления в современной России: Мат-лы научного семинара. — М.: Научный эксперт, 2011. Вып. 5(43). 96 с.

6. Зеленков М. Ю. Теоретико-методологические проблемы теории национальной безопасности Российской Федерации. — М.: Юридический ин-т МИИТа, 2013. 196 с.
7. Колин К. К. Вызовы XXI века и стратегические приоритеты развития России // Стратегические приоритеты, 2014. № 2. С. 25–42.
8. Лукъянов Г. В., Никишин Д. А., Веревкин Г. Ф. Информационное обеспечение мониторинга национальной безопасности в региональном разрезе // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 2. С. 193–204.
9. Лукъянов Г. В., Никишин Д. А., Веревкин Г. Ф., Косарик В. В. Специфика показателей национальной безопасности в контексте ее информационного мониторинга // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 4. С. 186–205.
10. Зацман И. М., Дурново А. А. Моделирование процессов формирования экспертных знаний для мониторинга программно-целевой деятельности // Информатика и её применения, 2011. Т. 5. Вып. 4. С. 59–73.
11. Зацман И. М., Дурново А. А. Разработка и применение программно-ориентированных индикаторов в сфере науки // Системы и средства информатики, 2012. Т. 22. № 1. С. 110–120.
12. Блюмин С. Л., Шуйкова И. А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. — Липецк: ЛЭГИ, 2001. 138 с.
13. Ларичев О. И. Вербальный анализ решений. — М.: Наука, 2006. 181 с.
14. Зацаринный А. А., Киселев Э. В. Некоторые подходы к формированию нормативно-технической базы для создания единого информационного пространства России // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 4. С. 206–220.

Поступила в редакцию 15.05.15

NORMATIVE AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF INFORMATION MONITORING ORGANIZATION OF NATIONAL SECURITY

G. V. Lukyanov, D. A. Nikishin, G. F. Verevkin, and V. V. Kosarik

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

Abstract: The article is devoted to normative-legal and methodological bases of creation of systems of monitoring and indicator assessment in the sphere of national security. It reveals normative legal acts and information as well as reference documents in the design and operation of such systems. Based on the existing organization of national security in the Russian Federation, a possible embodiment of an integrated functional structure of the information system of monitoring and indicator assessment including a list of the main categories of its data is proposed. The article also contains a description of the subsystems and functional blocks corresponding to an information system with emphasis on the methodological framework of the monitoring and evaluation of national security.

Keywords: national security; strategic planning; information monitoring; indicator evaluation; information resources; data model

DOI: 10.14357/08696527150314

References

1. Kontseptsiya dolgosrochnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17.11.2008 № 1662-r [The concept of long-term socioeconomic development of the Russian Federation for the period until 2020. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 17.11.2008 No. 1662-r].
2. Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 28 iyunya 2014 goda № 172-FZ «O strategicheskem planirovaniyu v Rossiyskoy Federatsii» [Federal law of the Russian Federation. June 28, 2014. No. 172-FZ "About strategic planning in the Russian Federation"].
3. Telemtaev, M. M. 2002. *Gosudarstvennoe sistemnoe upravlenie (sisternaya filosofiya gosudarstvennoy deyatel'nosti)* [Public system management (system philosophy of government activity)]. — Almaty: Infopress. 405 p.
4. Natsional'naya bezopasnost' Rossii v otsenkakh ekspertov. Analiticheskiy otchet po rezul'tatam ekspertnogo oprosa (versiya 2.4 ot 28.0.2011) [Russia's national security in expert assessments. Analytical report on the results of the expert survey (version 2.4 from 28.0.2011)]. — Moscow: Institute of Sociology of the Russian Academy of Sciences; ZIRCON, 2010. 56 p.
5. 2011. *Problemy strategicheskogo gosudarstvennogo planirovaniya i upravleniya v sovremennoy Rossii: Mat-ly nauchnogo seminara* [The Problems of State Strategic Planning and Management in Modern Russia: Seminar Proceedings]. Moscow: Nauchnyiy Ekspert [Scientific Expert] 5(43). 96 p.
6. Zelenkov, M. Yu. 2013. *Teoretiko-metodologicheskie problemy teorii natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii* [Theoretical and methodological problems of the theory of national security of the Russian Federation]. — Moscow: Yuridicheskiy Institut MIITa [Institute of Law of MIIT]. 196 p.
7. Kolin, K. K. 2014. Vyzovy XXI veka i strategicheskie priorityty razvitiya Rossii [Challenges of the XXI century and the strategic priorities of Russia's development]. *Strategicheskie Prioritetnye* [Strategic Priorities] 2:25–42.
8. Lukyanov, G. V., D. A. Nikishin, and G. F. Verevkin. 2014. Informatsionnoe obespechenie monitoringa natsional'noy bezopasnosti v regional'nom razreze [Information support monitoring of national security in the regional context]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(2):193–204.
9. Lukyanov, G. V., D. A. Nikishin, G. F. Verevkin, and V. V. Kosarik. 2014. Spetsifika pokazateley natsional'noy bezopasnosti v kontekste ee informatsionnogo monitoringa [Features of national security indicators in the context of its monitoring information]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(4):186–205.
10. Zatsman, I. M., and A. A. Durnovo. 2011. Modelirovaniye protsessov formirovaniya ekspertnykh znanii dlya monitoringa programmno-tselevoy deyatel'nosti [Modeling of processes of formation of expert knowledge for monitoring of goal-oriented activities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 5(4):59–73.

11. Zatsman, I. M., and A. A. Durnovo. 2012. Razrabotka i primenenie programmno-orientirovannykh indikatorov v sfere nauki [Development and application of program-oriented indicators in the field of science]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 22(1):110–120.
12. Blyumin, S. L., and I. A. Shuykova. 2001. *Modeli i metody prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennosti* [Models and methods of decision making under uncertainty]. Lipetsk: LEGI. 138 p.
13. Larichev, O. I. 2006. *Verbal'nyy analiz resheniy* [Verbal decision analysis]. Moscow: Nauka. 181 p.
14. Zatsarinnyy, A. A., and E. V. Kiselev. 2014. Nekotorye podkhody k formirovaniyu normativno-tehnicheskoy bazy dlya sozdaniya edinogo informatsionnogo prostranstva Rossii [Some approaches to forming a legal base for creation of unified information space of Russia]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(4):206–220.

Received May 15, 2015

Contributors

Lukyanov Gennady V. (b. 1952)—PhD, associate professor; Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; gena-mslu@mail.ru

Nikishin Dmitry A. (b. 1976) — Candidate of Science (PhD) in technology, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; dmnikishin@mail.ru

Verevkin Gennady F. (b. 1934)—Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; gennadij.verevkin2012@yandex.ru

Kosarik Valerii V. (b. 1970)—scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; valery_lek@mail.ru

СИСТЕМА ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОВ ИЗ ТЕКСТОВ ИСТОРИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

И. М. Адамович¹, О. И. Волков²

Аннотация: Из такой значимой части биографического исследования, как поиск информации в сети Интернет, выделяется в отдельный класс и описывается поиск с целью обнаружения полезной для исследования информации, характер которой исследователь не может заранее предугадать и отразить в соответствующем поисковом запросе — свободный поиск (СП). Обосновывается использование технологии автоматического извлечения фактов из текстов с целью поддержки свободного поиска в рамках биографического исследования. Описывается реализация такой технологии. Особое внимание уделяется средствам разрешения анафорических связей, когда интерпретация некоторого выражения зависит от другого выражения, ранее встречавшегося в тексте. Предлагается и обосновывается представление биографического факта как древовидной структуры. Описывается экспериментальная проверка применимости описываемой технологии к мемуарам и художественным текстам исторической направленности. Приводятся результаты экспериментов, подтверждающие применимость и перспективность данного подхода. Технология предназначена для широкого круга не являющихся профессиональными историками и биографами пользователей, что актуально в связи со все увеличивающимся общественным интересом к семейной истории.

Ключевые слова: биографическое исследование; извлечение фактов из текстов; разрешение анафорических связей; иерархия фактов

DOI: 10.14357/08696527150315

1 Введение

Специфика биографического исследования состоит в том, что в центре внимания исследователя находится конкретная личность и все без исключения стороны (социальные, экономические, политические, этнические, художественные и т. п.) ее реальной жизни [1]. Многообразие изучаемых аспектов жизни индивидуума, стоящего в центре исследования, приводит к огромному числу направлений поиска. Следствием этого является необходимость использования абсолютно всех доступных источников информации. Среди них Интернет, наряду с архивами и специальной литературой, является одним из наиболее значимых. При этом,

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Adam@amsd.com

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Volkov@amsd.com

как было показано в [2], биограф, как правило, не может рассчитывать, что прямые вопросы, стоящие перед ним на данном этапе исследования, могут быть непосредственно преобразованы в некоторые интернет-запросы, на которые поисковые машины (ПМ) выдадут информацию, содержащую столь же прямые ответы на них. Поэтому поиск информации при биографическом исследовании идет, как правило, в двух направлениях:

- (1) «косвенный» интернет-поиск, подробно рассмотренный в [2] и характеризующийся тем, что исследователь, опираясь на уже известную ему, как правило, фрагментарную, противоречивую и недостоверную информацию по теме исследования, придумывает косвенные вопросы и формулирует соответствующие запросы к ПМ, постепенно заполняя информационные лакуны;
- (2) просмотр текстов самой разной направленности, потенциально имеющих отношение к теме исследования, с целью обнаружения полезной для исследования информации, характер которой исследователь не может заранее предугадать, и, следовательно, не может отыскать ее с помощью каких-либо запросов. Такой вид поиска будем называть свободным поиском.

И если технологии поддержки первого направления достаточно проработаны [3], то для СП это не так. На данный момент, если исследователь имеет основания предполагать, что данный текст может содержать информацию, относящуюся к теме исследования, он вынужден просматривать его целиком. Для небольших текстов это оправдано, но для текстов большого объема (таких, как мемуары, художественные тексты исторической направленности и т. п.) это требует огромных временных затрат, что сильно снижает возможности использования СП.

Очевидно, что система автоматического извлечения фактов могла бы упростить задачу исследователя, позволив ему быстро ознакомиться с краткой «выжимкой» и по ней уже принять решение о целесообразности чтения всего документа. К сожалению, существующие коммерческие системы такого рода более ориентированы на мониторинг новостных сообщений, сообщений в маркетинговых целях, извлечение адресов электронной почты и т. п. [4]. Тексты, обрабатываемые в рамках этих задач, характеризуются простотой языка, лаконичностью и информационной насыщенностью. Тексты же историко-биографической направленности часто характеризуются низкой информационной насыщенностью и богатством используемых языковых конструкций. Поэтому была рассмотрена возможность создания новой, адаптированной к специфике биографического поиска, системы выделения фактов, что прежде всего требует правильного выбора подхода к представлению и обработке текстов. Такие подходы условно можно разделить на два класса: статистические и лингвистические [5]. Статистические подходы хотя и решают многие задачи обработки текстов, но являются подходами типа «грубой силы» и не позволяют принципиально решать многие задачи, такие как извлечение фактов, на высоком уровне качества. Существующие лингви-

стические подходы к представлению семантики текстов на естественных языках часто не обеспечивают достаточно эффективного решения задач автоматической обработки текстов. Связано это, прежде всего, с незаконченностью лингвистических исследований в области семантики языка, а также с многозначностью конструкций самого естественного языка [5]. Таким образом, адекватный выбор подхода представляет собой проблему. В качестве решения этой проблемы существует альтернативный подход к синтаксическому анализу, а именно: частичный синтаксический анализ. При частичном синтаксическом анализе полное дерево разбора не строится, а вместо этого анализатор сосредотачивается на поиске заранее определенных синтаксических конструкций в тексте [6]. Следует отметить, что данный подход является наиболее реализуемым и развивающимся, поскольку не требует привлечения команды профессиональных лингвистов. К примеру, в лаборатории Компьютерной лингвистики и когнитивных технологий обработки текстов Института проблем информатики ФИЦ ИУ РАН уже давно осуществляется создание современных интегральных семантических представлений для систем аналитической обработки текстовых знаний и машинного перевода. В основе этих работ лежит созданная И. П. Кузнецовым концепция формализма представления знаний, получившего название «расширенные семантические сети» (РСС), а также разработанный им язык ДЕКЛ, обеспечивающий гибкое преобразование структур РСС, включая поиск и порождение новых знаний [7–11].

С другой стороны, применимость частичного синтаксического анализа к описываемым задачам ввиду их специфики является неочевидной и требует проверки. Также многообразие информационных сущностей, интересующих исследователя в рамках биографического исследования, требует упрощенного подхода к способам их описания. Поэтому в рамках дальнейшего развития подхода, сформировавшегося в ИПИ ФИЦ ИУ РАН, было принято решение совместить его с концепциями извлечения структурированных данных из текста при помощи контекстно-свободных грамматик.

2 Томита-парсер

Вышеописанный подход был удачно реализован в продукте компании Яндекс Томита-парсере [12]. Томита-парсер создан для извлечения структурированных данных из текста на естественном языке. Вычленение фактов происходит при помощи контекстно-свободных грамматик и словарей ключевых слов. Томита-парсер разрабатывался специально с прицелом на упрощение работы с алгоритмом. Был составлен несложный синтаксис для создания словарей и грамматик, продумана работа с морфологией. Таким образом, важным достоинством Томита-парсера является легкость его адаптации к конкретным задачам. К существенным его недостаткам следует отнести тот факт, что парсер запускается всегда на одном предложении. Это означает, что с его помощью невозможно разрешение анафорических связей. Например, из текста «Приехал Иван Иванович Иванов.

Он был генералом» невозможно выделить факт, что Иван Иванович Иванов был генералом. Также, например, из текста «Иван Иванович Иванов родился в 1941 году. Женился в 1962 году. Умер в 2001 году» невозможно выделить факт, что Иван Иванович Иванов женился в 1962 году. Построение механизма разрешения анафорических ссылок является важной подзадачей в задаче анализа текстов [13, 14], и адекватная интерпретация текста без него невозможна. Поэтому было принято решение о создании собственной системы извлечения фактов из текстов на естественном языке, свободной от этого недостатка, но опирающейся на подход, подобный реализованному в Томита-парсере. Разработанная система была названа Т-парсер с целью подчеркнуть ее «родство» с Томита-парсером, хотя она является полностью оригинальной разработкой и обладает рядом свойств, отсутствующих в Томита-парсере.

3 Принцип работы Т-парсера

3.1 Сегментация текста

Т-парсер разбирает текст пофразно, т. е. первый этап его работы — это выделение из текста очередного предложения (сегментация). Вообще говоря, проблема корректного разбиения текста на предложения весьма сложна и нетривиальна [15]. В некоторых случаях невозможно определить конец предложения, опираясь исключительно на некие формальные признаки, без проведения синтаксического и семантического анализа. Например, текст «Груши стоили 7 руб. Иванову они понравились» содержит два предложения, а текст «Груши за 7 руб. Иванову понравились» — одно. Поэтому в Т-парсере был принят заведомо неидеальный алгоритм сегментации, основанный на формальных признаках конца фразы. В принципе, в качестве одной фразы данным алгоритмом может быть выделено несколько соседних предложений, но на качество выделения фактов это не влияет.

3.2 Препарсинг

Для успешного разбора фраза подлежит подготовке:

- убираются двойные пробелы;
- убираются переводы строк;
- унифицируются кавычки;
- унифицируются тире;
- убираются верхние индексы (номера сносок).

3.3 Морфологический разбор

Далее фраза преобразуется в последовательность позиций. Позиция соответствует одному слову (устойчивому словосочетанию) или одному знаку препинания

во фразе и представляет собой массив вариантов морфологической интерпретации данного слова или словосочетания. Так (для простоты здесь приведены не все морфологические характеристики слов), слову «Волков» во фразе будет соответствовать позиция с вариантами «Волков — фамилия, ед. число, именительный падеж» и «волк — существительное, мн. число, родительный падеж». Знаку препинания соответствует позиция с единственным вариантом. Морфологический разбор осуществляется с помощью словаря М. Хагена «Полная парадигма. Морфология», дополненного некоторым набором сокращений. При этом если слово присутствует в словаре, но также может быть распознано как часть словосочетания, то будет распознано словосочетание. Например, при разборе предложения «Без зазрения совести прочту вам повесть моего сочинения» в словаре обнаруживается предлог «без» и наречие «без зазрения совести». Более длинное словосочетание имеет приоритет, и начало предложения будет распознано как одно наречие. Для слов, отсутствующих в словаре, предусмотрен механизм подбора аналогов. Механизм реализован следующим образом: от слова последовательно отбрасываются начальные буквы и в словаре ищутся слова, оканчивающиеся на получившееся после отбрасывания сочетание букв. Как только такие слова найдены, по ним определяются морфологические характеристики и по их образцу формируется основная форма слова. Так, для слова «Эстляндии», которое отсутствует в словаре, последовательно ищутся слова, заканчивающиеся на «стляндии», «тляндии», «ляндии», «яндии» (для которых слов не находится) и «ндии», для которой находятся слова «индии» и «герундии». Формируются варианты, из которых первый же является верным:

- эстляндия (сущ неод ед жен пр);
- эстляндий (сущ неод ед муж пр);
- эстляндий (сущ неод мн им);
- эстляндий (сущ неод мн вин).

Также помимо слов русского языка определяются время, дата, число, римское число, латинское (написанное латинскими буквами) слово, фамилия, имя, отчество, инициалы, аббревиатура. Фамилия и отчество определяются с помощью оригинальных эвристических алгоритмов, имя — по словарю имен.

3.4 Грамматика

Для разбора текста и выделения фактов готовится грамматика, написанная на специальном языке и представляющая собой несколько независимых именованных наборов правил. Разделение грамматики на группы правил служит для выделения фактов в ситуации, когда одна и та же часть текста должна интерпретироваться по-разному разными правилами, т. е. каждый набор правил из грамматики служит для выделения отдельной группы фактов. Независимость наборов правил в грамматике означает, что результаты применения правил одной группы никак не влияют на применение правил в другой группе за одним

исключением: контекст, служащий для разрешения анафорических связей (см. разд. 3.9), является общим для всех групп правил в грамматике. Каждое правило в наборе имеет имя и последовательность описаний позиций (правая часть правила). Имена правил могут совпадать, если правила описывают разные варианты написания одного и того же понятия. Описание позиции представляет собой некоторые требования к позиции во фразе:

- наличие и расположение заглавных букв;
- соответствие определенному типу;
- наличие в описании определенных помет;
- грамматическая согласованность с другими определенными позициями и т. п.

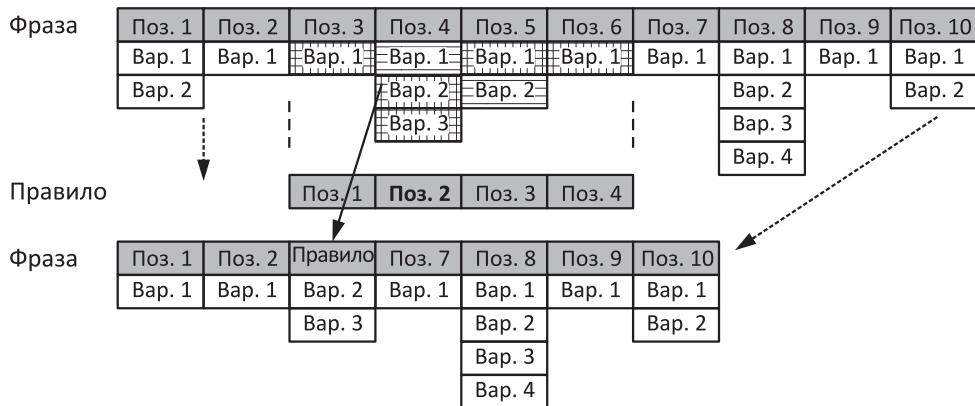
В качестве описания позиции также может служить имя другого правила. Именно это позволяет применять правила последовательно.

Для упрощения записи в описании правила предусмотрена возможность для некоторой группы последовательных позиций указать число повторов данной группы, причем это число может быть переменным и задаваться максимумом и минимумом. Так, задание для некоторой группы позиций числа повторов от 0 до 2 (диапазон повторов от 0 до 2) приведет к тому же эффекту, как если бы вместо одного правила было указано три с одним и тем же именем, но у одного в описании позиций данная группа отсутствовала бы вообще, у другого — присутствовала, а у третьего — была бы повторена 2 раза. Далее группу позиций правила, для которой указан некий диапазон числа повторов, будем называть группой повтора. Группа повтора может включать в себя другие группы повтора.

3.5 Применение правила к фразе

Правило применимо к фразе со сдвигом S (целое число от 0), если для каждой позиции правила (пусть ее номер в правиле равен i) у позиции во фразе с номером $S + i$ найдется вариант, не противоречащий требованиям позиции правила (включая требования согласования с другими позициями). Правило применимо, если существует такой сдвиг, что правило применимо с этим сдвигом. Результат применения правила к фразе — фраза, в которой все позиции, соответствующие позициям правила, заменены на позицию с именем этого правила и с набором вариантов, — подошедшие варианты позиции фразы, соответствующей специально помеченной как корневая позиции правила.

Если некоторые позиции правила помечены специальным флагом, то все позиции, соответствующие позициям правила, будут заменены не на одну позицию с именем этого правила, а на несколько, соответственно числу позиций, помеченных этим флагом. Флаг используется в случае, когда в разбираемой фразе имеется общий признак нескольких объектов и требуется увязать этот признак с каждым из объектов. Так, например, во фразе «Иван, Олег и Петр Ивановы» требуется выделить отдельно Ивана Иванова, Олега Иванова и Петра Иванова. Или во фразе «Иванов, Петров и Сидоров — программисты» требуется

**Рис. 1** Применение правила к фразе

выделить отдельно программиста Иванова, программиста Петрова и программиста Сидорова. Поскольку признак (общая фамилия «Иванов» в первом случае и общая профессия «программист» во втором случае) — одна позиция, то и определен он может быть только одним правилом. Но поскольку обычно правило порождает только одну позицию, то раздельное выделение объектов невозможно. Чтобы обойти это ограничение, используется этот флаг у позиций правила, соответствующих объектам. При наличии таких признаков правило применяется несколько раз — по числу позиций с этими признаками. При каждом применении игнорируются все позиции, помеченные флагом, кроме одного.

На рис. 1 приведен пример наложения правила из 4-х позиций на фразу из 10 позиций со сдвигом 2. Корневая позиция правила выделена жирным шрифтом (поз. 2). Варианты, удовлетворяющие требованиям соответствующей позиции правила, показаны штриховкой в клетку, не удовлетворяющие — горизонтальной штриховкой. Варианты результата соответствуют вариантам 2 и 3 от поз. 4 фразы. Результат наложения имеет длину 7 позиций.

3.6 Оптимальное правило

Правило называется оптимальным, если результат его применения к фразе имеет наименьшую длину. Если два правила имеют одну (наименьшую) длину, то оптимальным считается правило, результат применения которого имеет больше позиций с именем правил (большее число замен). Если таких правил несколько, то оптимальное будет выбрано из них случайным образом.

3.7 Антиправила

Группа правил помимо собственно правил может содержать так называемые антиправила, имеющие ту же структуру, что и правила. Каждое антиправило

связано с каким-либо именем правила (т. е. с некоторым набором правил, имеющих одно и то же имя). С помощью антиправила можно задать дополнительные условия применимости правила, накладываемые на позиции, окружающие позиции, к которым применяется правило. Антиправило применяется к фразе после применения одноименного правила, и если антиправило оказывается применимо, то это отменяет применение правила, т. е. данное правило не будет учитываться при выборе оптимального правила.

Например, могут понадобиться антиправила, запрещающие применение правила, определяющего слово «философ» как профессию, в случаях, когда по окружению можно сделать вывод, что речь идет не о профессии, а о фамилии (например, фамилия Философов). Необходимы запреты применения правила в случаях:

- когда слово с заглавной буквы не является первым в предложении;
- когда за словом идет глагол единственного числа (ср.: «Философов был генералом» — речь идет о фамилии; «Философов выслали из страны» — речь идет о профессии).

3.8 Приоритет правил

Для правил в группе может быть указан приоритет. Всегда сначала ищется оптимальное правило среди правил с более высоким приоритетом, и только после того, как ни одно правило с высоким приоритетом уже не может быть применено, ищется оптимальное правило среди правил с более низким приоритетом. Градации приоритета может быть много. Если приоритет не указан, все правила в группе считаются имеющими один приоритет.

3.9 Контекст

Вышеописанный алгоритм осуществляет разбор фразы, но никак не решает ранее описанной проблемы разрешения анафорических связей, требующих использования информации, выделенной в предыдущей фразе. Так, первый пример «Приехал Иван Иванович Иванов. Он был генералом» требует замены местоимения «он» на упоминавшегося в предыдущей фразе «Иванов Иван Иванович». Такую задачу будем называть заменой по контексту. Во втором примере «Иван Иванович Иванов родился в 1941 году. Женился в 1962 году. Умер в 2001 году» требуется вставка перед словом «женился» упоминавшегося в предыдущей фразе «Иванов Иван Иванович». Такую задачу будем называть заполнением лакун по контексту. Для решения этих задач требуется формирование контекста, т. е. запоминание некоторой информации, выделяемой при разборе, для использования при разборе последующих фраз. Сохраненный контекст используется для заполнения лакун по контексту, а если для данного контекста в данной группе указано правило замены, то он также используется для замен по контексту. Формироваться контекст может двумя способами.

3.9.1 Правила, порождающие контекст

Для любого правила есть возможность указать, что оно порождает контекст, т. е. при каждом применении этого правила сохраняется результат его применения с указанием положения в тексте (номер фразы и номер позиции в символах). Например, если правило, представленное на рис. 1, помечено как порождающее контекст, то в результате его применения будет сохранена как контекст поз. 3 из результирующей фразы с указанием ее положения в тексте. Сохраненный контекст является общим для всех групп правил, несмотря на то что перечень правил, порождающих контекст, для каждой группы свой. Правило помечается как порождающее контекст, если в его группе задана одноименная декларация контекста.

3.9.2 Позиция правила, порождающая контекст

К сожалению, вышеописанного механизма порождения контекста не всегда достаточно. Так, в примере «Иванов родился в Николаеве. Петров родился там же» (Николаев — украинский город) для определения места рождения Петрова требуется замена по контексту сочетания «там же» на «Николаев». Для этого при разборе первой фразы примера должен быть сформирован соответствующий контекст. Но любое правило, применимое к слову «Николаев», так же обязательно будет применимо и к словам «Иванов» и «Петров». Таким образом, сочетание «там же» будет заменено не на «Николаев», а на «Петров», чего не должно быть.

Для разрешения этой проблемы предусмотрена возможность пометить одну позицию правила как порождающую контекст. Это означает, что позиция фразы, соответствующая позиции правила с данным признаком, должна быть сохранена как контекст с заданным именем. В нашем примере должно быть создано правило, применимое к сочетанию «родился в Николаеве», и только третья позиция этого правила должна порождать контекст.

3.10 Замены по контексту

Правая часть правила замены полностью подобна последовательности описания позиций правила. Соответственно, если такое правило применимо, то ищется сохраненный контекст, одноименный правилу замены. И подобно тому, как при применении правила позиции фразы, соответствующие правой части правила, заменяются на новую позицию с именем правила и с вариантом, соответствующим корневой позиции правила, при применении правила замены позиции фразы, соответствующие правой части правила замены, заменяются на ранее сохраненный адекватный контекст. Под адекватностью контекста понимается:

- соответствие имени правила замены и сохраненного контекста;
- соответствие требованиям согласования, если таковые требования имеются.

Например: если с именем «Персона» сохранен контекст «Маша» и «Петя»,

то при замене местоимения «она» должен использоваться контекст «Маша», но не «Петя»;

- соответствие требованиям «свежести» контекста, если таковые имеются, т. е. должна иметься возможность задать число фраз или символов, в пределах которого контекст все еще применим.

После замены к фразе, возможно, станет применимым какое-либо правило, которое не было применимо до замены.

3.11 Заполнение лакун по контексту

В описании правой части правил некая позиция может быть помечена как потенциальная лакуна. Если при попытке применения правила к фразе не находится соответствия именно этой позиции, то среди сохраненных контекстов ищется адекватный контекст. Под адекватностью контекста понимается:

- соответствие позиции и сохраненного контекста. Из этого следует, что как потенциальная лакуна может быть помечена только позиция с именем правила;
- соответствие требованиям потенциальной лакуны в правиле;
- соответствие требованиям «свежести» контекста, если таковые имеются.

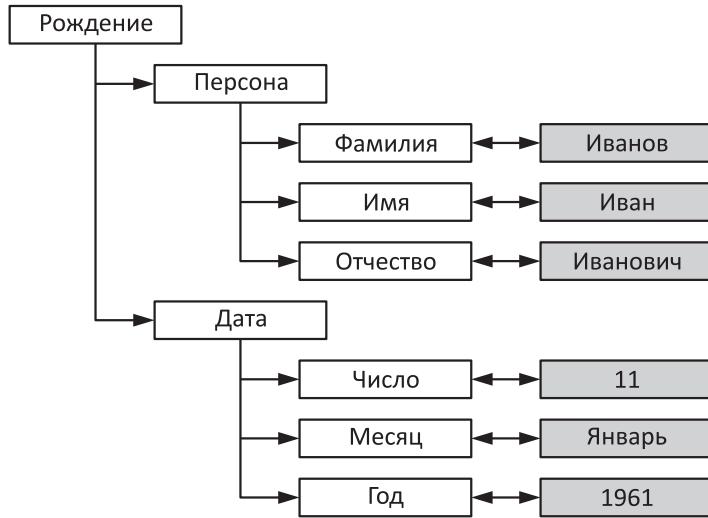
Найденный контекст вставляется во фразу на место, соответствующее потенциальной лакуне в правиле, и после этого правило применяется.

3.12 Выделение фактов

Под биографическим фактом понимается утверждение, что некая характеристика некоторого объекта принимает некоторое конкретное значение [16]. Применительно к Т-парсеру характеристикой, подразумевающей наличие своего объекта, является правило, а значением — выделенный этим правилом фрагмент разбираемого предложения. Так, правило «фамилия», выделившее в тексте фрагмент «Иванов», сформирует факт, что некто имеет фамилию Иванов, т. е. существует объект, у которого характеристика «фамилия» принимает значение «Иванов» (рис. 2).

В соответствии с логикой работы Т-парсера результат применения правила, в свою очередь, может быть выделен неким правилом, что формирует иерархию фактов, т. е. под фактом понимается иерархическая структура именованных понятий, терминальные узлы которой содержат выделенные из фразы слова или словосочетания.

Любая позиция в правой части правила может быть помечена как фактобразующая и ей назначено имя. При последовательном применении правил к фразе происходит накопление фактов и построение иерархии понятий, т. е. при замещении группы позиций во фразе на позицию с именем правила к этой новой позиции привязываются все факты, ранее привязанные к замещаемым позициям. При этом глубина иерархии увеличивается на одну ступень.

**Рис. 2** Пример факта «рождение»

Некоторые правила помечены как терминальные. При применении терминального правила все накопленные в замещаемой части факты записываются в файл фактов.

3.13 Алгоритм

Обработка текста состоит из следующих этапов, выполняемых циклично, пока в тексте есть еще неразобранные фразы:

- (1) выделение фразы;
- (2) подготовка фразы;
- (3) морфологический разбор фразы;
- (4) для каждой группы правил: парсинг.

Парсинг представляет собой последовательное выполнение следующих шагов:

- (1) предварительный разбор фразы с помощью правил данной группы с целью формирования контекста;
- (2) применение контекста к фразе;
- (3) финальный разбор фразы с помощью правил данной группы с выделением фактов.

Разбор фразы (как предварительный, так и финальный) осуществляется по следующему алгоритму:

- (1) задается текущий уровень приоритета, равный самому высокому;
- (2) циклически применяются все правила с приоритетом не ниже текущего.

При этом если для правила существуют одноименные антиправила, то они применяются к результату применения правила. Если хоть одно применение антиправила успешно, то применение правила считается неуспешным и оно не учитывается при выборе оптимального правила;

- (3) если найдено оптимальное правило, то оно применяется к фразе. Для предварительного разбора: если правило формирует контекст, то формируется контекст. Для финального разбора: накопление фактов. Если правило терминальное, то сохранение фактов;
- (4) если терминальное правило не найдено, а текущий приоритет не самый низкий, то текущий приоритет понижается и повторяется цикл;
- (5) если терминальное правило не найдено, а текущий приоритет уже не может быть понижен, то цикл повторяется с заполнением лакун;
- (6) цикл выполняется до тех пор, пока к фразе применимо хоть одно правило. Если на данном шаге цикла ни одно правило не применилось, осуществляется переход к новой фразе.

4 Проверка применимости Т-парсера

Для проверки выбранного подхода были созданы грамматики для определения следующих атрибутов персоны:

- ФИО;
- факт рождения, дата и место рождения;
- факт смерти, дата и место смерти;
- профессия / род занятий;
- звание / чин;
- титул.

Грамматики отлаживались на разделе примечаний к книге Н. Е. Врангеля «Воспоминания: от крепостного права до большевиков», с тем чтобы добиться на 100% корректного и полного выделения фактов из вышеприведенного списка. После этого полученные наборы правил были применены к двум текстам: собственно воспоминания Н. Е. Врангеля и воспоминания С. Ю. Витте. Были проанализированы результаты и посчитаны:

- полностью и корректно распознанные факты;
- частично распознанные факты;
- неверно распознанные факты;
- нераспознанные факты;
- лишние факты, ошибочно выделенные парсером.

Результаты тестирования

Факты	Врангель	Витте
Полностью и корректно распознаны	66,12%	71,94%
Частично распознаны	4,49%	3,95%
Неверно распознаны	5,31%	5,14%
Не распознаны	20,41%	10,67%
Лишние	3,67%	8,30%
Итого	100,00%	100,00%

Результаты приведены в таблице.

Тем самым проверка показала, что даже ограниченный набор правил, подготовленный на одном тексте, применим к текстам разных авторов с устойчивым результатом около 70%.

5 Выводы

Разработана технология выделения фактов из текстов и реализована в форме Т-парсера. Данная разработка позволяет гибко настраивать правила выделения фактов без привлечения профессиональных программистов или лингвистов, т. е. технология доступна широкому кругу лиц. Доказана применимость технологии в историко-генеалогических целях и ее эффективность. Также возможно ее применение и в других областях.

Литература

1. Иконникова С. Н. Биографика как часть исторической культурологии // Вестник СПбГУКИ, 2012. № 2(11). С. 6–10.
2. Адамович И. М., Волков О. И. Средства поддержки интернет-поиска при проведении биографических исследований // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 2. С. 178–192.
3. Адамович И. М. Методы и средства справочно-поисковой поддержки научных и социально-культурных проектов на основе интеграции данных разнородных биографических источников // Отчет о НИР. — М.: ИПИ РАН, 2012. С. 67–84.
4. Нежданов И. Мониторинг новостей в конкурентной разведке // Технологии конкурентной разведки (Competitive Intelligence), 2011. <http://nejdanov.livejournal.com/17026.html>.
5. Смирнов И. В., Шелманов А. О. Семантико-синтаксический анализ естественных языков. Ч. I. Обзор методов синтаксического и семантического анализа текстов // Искусственный интеллект и принятие решений, 2013. № 1. С. 41–54.
6. Степанов П. А. Системы анализа текстов естественного языка // Альманах современной науки и образования, 2013. № 6(73). С. 159–161.
7. Kuznetsov I. P., Kozerenko E. B., Kuznetsov K. I., Timonina N. O. Intelligent system for entities extraction (ISEE) from natural language texts // Workshop (International) on Conceptual Structures for Extracting Natural Language Semantics (SENSE'09)

- at the 17th Conference (International) on Conceptual Structures (ICCS'09) Proceedings / Eds. U. Priss, G. Angelova. — Moscow, Russia: University Higher School of Economics, 2009. P. 17–25.
8. *Kuznetsov I. P., Kozerenko E. B., Matskevich A. G.* Intelligent extraction of knowledge structures from natural language texts // 2011 IEEE/WIC/ACM Joint Conferences (International) on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2011) Proceedings, 2011. P. 269–272.
 9. *Kozerenko E. B., Ermakov P. V.* The strategies of syntactic analysis based on head-driven grammars and the methods of their implementation in information systems // Информатика и её применения, 2011. Т. 5. Вып. 4. С. 107–113.
 10. *Кузнецов И. П., Сомин Н. В.* Выявление имплицитной информации из текстов на естественном языке: проблемы и методы // Информатика и её применения, 2012. Т. 6. Вып. 1. С. 49–58.
 11. *Шарнин М. М., Кузнецов И. П.* Особенности семантического поиска информационных объектов на основе технологии баз знаний // Информатика и её применения, 2012. Т. 6. Вып. 2. С. 113–121.
 12. *Огородник Р. В., Серебреная Л. В.* Обработка текста с помощью Томита-парсера // Информационные технологии и системы 2014 (ИТС 2014): Мат-лы Междунар. науч. конф. — Минск: БГУИР, 2014. С. 230–231.
 13. *Малковский М. Г., Старостин А. С., Шилов И. А.* Метод разрешения местоименно-й анафоры в процессе синтаксического анализа // Научные труды SWORLD, 2013. № 4(11). С. 41–49.
 14. *Боярский К. К., Каневский Е. А., Степукова А. В.* Выявление анафорических отношений при автоматическом анализе текста // Науч.-технич. вестник информационных технологий, механики и оптики, 2013. № 5(87). С. 108–112.
 15. *Урюпина О.* Автоматическое разбиение текста на предложения для русского языка // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По мат-лам ежегодной Междунар. конф. «Диалог». — М.: РГГУ, 2008. Вып. 7(14). С. 539–544.
 16. *Маркова Н. А.* Логика биографических фактов // Информатика и её применения, 2012. Т. 6. Вып. 2. С. 87–96.

Поступила в редакцию 13.08.15

THE SYSTEM OF FACTS EXTRACTION FROM HISTORICAL TEXTS

I. M. Adamovich and O. I. Volkov

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

Abstract: Text surfing is described as a separate subclass of such important part of biographic investigation as Internet search. Text surfing is the search of useful information, the character of which cannot be foreseen, and therefore, the appropriate web search query cannot be formulated. The technology of automatic fact extraction is proposed for text surfing. The implementation of such technology

is described. Special attention is paid to the problem of anaphora resolution, when the interpretation of an expression depends on another expression in the context. A new hierarchical view of a biographical fact is proposed and analyzed. The experimental verification of applicability of the proposed technology for the memoir and historical literature is described. The article reports the results of these experiments, which confirm applicability and perspectivity of the proposed approach. This technology is meant for a wide range of users, which are not professional historians and biographers. This is important today because public interest in family history is increasing.

Keywords: biographic investigation; facts extraction from texts; anaphora resolution; hierarchy of facts

DOI: 10.14357/08696527150315

References

1. Ikonnikova, S. N. 2012. Biografika kak chast' istoricheskoy kul'turologii [Biographical studies as part of the historical cultural studies]. *Vestnik SPbGU* [Bulletin of Saint-Petersburg State University of Culture and Art] 2(11):6–10.
2. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2014. Sredstva podderzhki internet-poiska pri provedenii biograficheskikh issledovaniy [The technology of Internet-searching as the part of the biographic investigation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 2(24):178–192.
3. Adamovich, I. M. 2012. Metody i sredstva spravochno-poiskovoy podderzhki nauchnykh i sotsial'no-kul'turnykh proektor na osnove integratsii dannykh raznorodnykh biograficheskikh istochnikov [Methods and tools of information support of scientific and sociocultural projects based on the integration of heterogeneous data of different biographical sources]. Research Report. IPI FRC CSC RAS. Moscow. 92 p.
4. Nezhdanov, I. 2011. Monitoring novostey v konkurentnoy razvedke [The news monitoring in Competitive Intelligence]. Available at: <http://nejdanov.livejournal.com/17026.html> (accessed August 12, 2015).
5. Smirnov, I. V., and A. O. Shelmanov. 2013. Semantiko-sintaksicheskiy analiz estestvennykh yazykov. Ch. I. Obzor metodov sintaksicheskogo i semanticheskogo analiza tekstov [Semantic-syntactic analysis of natural languages. Pt. I. A review of methods for semantic and syntactic analysis of text]. *Iskusstvennyy Intellekt i Prinyatie Resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making] 1:41–54.
6. Stepanov, P. A. 2013. Sistemy analiza tekstov estestvennogo yazyka [Systems of natural language texts analysis]. *Al'manakh Sovremennoy Nauki i Obrazovaniya* [Almanac of Modern Science and Education] 6(73):159–161.
7. Kuznetsov, I. P., E. B. Kozerenko, K. I. Kuznetsov, and N. O. Timonina. 2009. Intelligent system for entities extraction (ISEE) from natural language texts. *Workshop (International) on Conceptual Structures for Extracting Natural Language Semantics (SENSE'09) at the 17th Conference (International) on Conceptual Structures (ICCS'09) Proceedings*. Eds. U. Priss and G. Angelova. Moscow, Russia: University Higher School of Economics. 17–25.
8. Kuznetsov, I. P., E. B. Kozerenko, and A. Matskevich. 2011. Intelligent extraction of knowledge structures from natural language texts. *Web Intelligence/IAT Workshops*. 269–272.

9. Kozerenko, E. B., and P. V. Ermakov. 2011. The strategies of syntactic analysis based on head-driven grammars and the methods of their implementation in information systems. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 5(4):107–113.
10. Kuznetsov, I. P., and N. V. Somin. 2012. Vyyavlenie implitsitnoy informatsii iz tekstov na estestvennom yazyke: Problemy i metody [Extraction of implicit information from the texts in natural language: Problems and methods]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 6(1):49–58.
11. Sharnin, M. M., and I. P. Kuznetsov. 2012. Osobennosti semanticeskogo poiska informatsionnykh ob'ektorov na osnove tekhnologii baz znaniy [Semantic search of natural language information on the basis of knowledge base technology]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 6(2):113–121.
12. Ogorodnik, R. V., and L. V. Serebrenaya. 2014. Obrabotka teksta s pomoshch'yu Tomita-parsera [Text processing using Tomita-parser]. *Scientific Symposium (International) "Information Technology and Systems 2014" Proceedings*. Minsk. 220–231.
13. Mal'kovskiy, M. G., A. S. Starostin, and I. A. Shilov. 2013. Metod razresheniya mestoimennoy anafory v protsesse sintaksicheskogo analiza [Method of anaphoric pronoun resolution at the process of syntax analysis]. *Nauchnye Trudy SWORLD [SWORLD Proceedings]* 4(11):41–49.
14. Boyarskiy, K. K., E. A. Kanevskiy, and A. V. Stepukova. 2013. Vyyavlenie anaforicheskikh otnosheniy pri avtomaticheskem analize teksta [Anaphoric relations identification by automatic text analysis]. *Nauch. Tekhnich. Vestnik Informaticheskikh Tekhnologiy, Mekhaniki i Optiki* [Scientific and Technical J. of Information Technologies, Mechanics and Optics] 5(87):108–112.
15. Uryupina, O. 2008. Avtomaticheskoe razbienie teksta na predlozheniya dlya russkogo yazyka [Detecting sentence boundaries in Russian]. *Komp'yuternaya Lingvistika i Intellektual'nye Tekhnologii: Po mat-lam Ezhegodnoy Mezhdunar. Konf. "Dialog"* ["Computational Linguistics and Intellectual Technologies" by Annual Conference (International) "Dialog" Proceedings]. Moscow. 7(14):539–544.
16. Markova, N. A. 2012. Logika biograficheskikh faktov [A logic of biographical facts]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 6(2):49–58.

Received August 13, 2015

Contributors

Adamovich Igor M. (b. 1934) — Candidate of Science (PhD) in technology, Head of Department, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; Adam@amsd.com

Volkov Oleg I. (b. 1964) — leading programmer, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; Volkov@amsd.com

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АНАЛИЗА БАЙЕСОВСКИХ МОДЕЛЕЙ В ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И НАДЕЖНОСТИ*

A. A. Кудрявцев¹

Аннотация: Работа содержит описание учебно-исследовательского программного комплекса (УИПК), предназначенного для анализа вычислительных аспектов исследования байесовских моделей в теории массового обслуживания и надежности. Комплекс осуществляет вычисление разнообразных вероятностных характеристик параметра загрузки системы, вероятности «непотери» вызова и средней длины очереди, таких как функция распределения, плотность, моменты и квантили, для моделей в теории массового обслуживания (при заданных априорных распределениях параметров входящего потока и обслуживания), а также вычисление средней надежности сложной модифицируемой системы для моделей в теории надежности (при заданных априорных распределениях среднего коэффициента «эффективности» и «дефективности» средства, исправляющего ошибки в системе). Приводится несколько аналитических результатов, дающих представление о решаемых задачах, а также подробное описание структуры программного комплекса с примерами различных особенностей функционирования.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационные системы; сложные модифицируемые системы; теория массового обслуживания; теория надежности; байесовский подход; программный комплекс

DOI: 10.14357/08696527150316

1 Введение

Теория массового обслуживания и теория надежности являются весьма развитыми областями математики, получившими широкое применение в анализе сложных систем, прежде всего информационно-телекоммуникационных систем и сетей. В настоящее время развитие этих теорий ведется прежде всего в направлении усложнения моделей, описывающих различные параметры и характеристики исследуемой системы. Однако зачастую даже самая простая система может быть задана «неточно». Чаще всего подобные ситуации возникают при

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 14-11-00397).

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики; Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, nubigena@mail.ru

рассмотрении целой группы однородных объектов, каждый из которых имеет свои особенности, обусловленные, например, вариациями при производстве. Конечный пользователь применяет лишь один продукт из целой совокупности, удовлетворяющей соответствующим ГОСТам, которые чаще всего допускают незначительные отклонения параметров функционирования от заявленных. Так, согласно приложению 3 ГОСТа 27.002-83 «Методы оценки надежности по параметрам качества изготавляемой продукции» оценка точности технологических систем считается удовлетворительной, в частности, при выполнении условия: «требуемые значения параметров точности изготавляемой продукции должны принадлежать области их возможных значений, установленных (регламентированных) в базовой документации».

Вполне естественным предположением в подобной ситуации является рассмотрение параметров функционирования системы не как наперед заданных постоянных, а как некоторых случайных величин, каждая из которых имеет собственное априорное распределение (зачастую также задаваемое ГОСТом). Этот подход к построению моделей принято называть байесовским.

Основным методом исследования байесовских моделей является усреднение характеристик системы по априорным распределениям варьируемых параметров с целью получения информации о функционировании совокупности систем в целом (или о функционировании случайно выбранной из совокупности системы).

Несмотря на то что подобная постановка задачи выглядит достаточно просто, аналитическое исследование смесей априорных распределений может приводить к достаточно громоздким выкладкам, что затрудняет исследование байесовских моделей чисто математическими методами. Результаты зачастую формулируются в терминах специальных функций, таких как бета-функция, интегральная показательная функция, обобщенная гипергеометрическая гауссова функция и др. По этой причине необходимо иметь вычислительный аппарат, позволяющий визуализировать аналитические результаты с целью более глубокого исследования особенностей той или иной совокупности сложных систем массового обслуживания или некоторой сложной модифицируемой системы. Именно о таком аппарате (программном комплексе) пойдет речь в данной статье.

Подробное описание предпосылок для исследования, особенностей и библиографии байесовских моделей в теории массового обслуживания и надежности можно найти в книге [1]. Здесь остановимся лишь на технической составляющей вопроса.

2 Назначение программного комплекса

Учебно-исследовательский программный комплекс анализа байесовских моделей в теории массового обслуживания и надежности предназначен для вычисления различных вероятностных характеристик модели по заданным априорным распределениям случайных параметров λ и μ . В задачах массового обслуживания параметр λ имеет смысл характеристики входящего потока, а параметр μ —

характеристики обслуживания; в задачах теории надежности теми же буквами обозначаются соответственно средний параметр «эффективности» и «дефективности» средства, исправляющего ошибки в сложной модифицируемой системе.

Исследуемыми характеристиками являются следующие. Для байесовских моделей в теории массового обслуживания вычисляются функция распределения $F_\rho(x)$, плотность $f_\rho(x)$, математическое ожидание $E\rho$ и второй момент $E\rho^2$ коэффициента загрузки системы $\rho = \lambda/\mu$ и аналогичные характеристики вероятности «непотери» вызова $\pi = 1/(1+\rho)$, а также квантильные (в том числе медиана, интерквартильный размах) характеристики несобственных распределений средней длины очереди $N = \rho/(1-\rho)$. Для моделей в теории надежности вычисляется средняя надежность системы $p_{\text{сред}}$.

В качестве иллюстрации приведем два утверждения из [1], показывающие аналитические представления характеристик, подлежащих вычислению.

Теорема 1. Рассмотрим систему $M|M|1|0$. Пусть параметр входящего потока λ имеет распределение Эрланга с параметрами $k \geq 1$ и $\theta > 0$, а параметр обслуживания μ имеет вырожденное распределение. Тогда коэффициент загрузки ρ имеет распределение Эрланга с параметрами k и $\mu\theta$, а характеристики вероятности «непотери» вызова π определяются соотношениями:

$$f_\pi(x) = \frac{\mu^k \theta^k (1-x)^{k-1} \exp\{-\mu\theta(1-x)/x\}}{(k-1)! x^{k+1}}, \quad x \in (0, 1);$$

$$E\pi = \frac{(-1)^k \mu^k \theta^k}{(k-1)!} \left[e^{\mu\theta} \text{Ei}(-\mu\theta) + \sum_{n=1}^{k-1} \frac{(-1)^{n+1} (n-1)!}{\mu^n \theta^n} \right];$$

$$E\pi^2 = \begin{cases} \mu\theta - \mu\theta E\pi & \text{для } k = 1, \\ \frac{(-1)^k \mu^k \theta^k}{(k-2)!} \left[-e^{\mu\theta} \text{Ei}(-\mu\theta) + \sum_{n=1}^{k-2} \frac{(-1)^n (n-1)!}{\mu^n \theta^n} \right] - \mu\theta E\pi & \text{для } k \geq 2. \end{cases}$$

Теорема 2. Пусть средний параметр «эффективности» λ и средний параметр «дефективности» μ независимы и имеют соответственно бета-распределение с параметрами (k, l) и (m, n) , $k, l, m, n > 0$. Тогда средняя надежность системы

$$\begin{aligned} p_{\text{сред}} &= \\ &= \frac{B(m+k, l)}{B(m, n)B(k, l)(m+1)} G_{1,0}^{2,1}(m+1, 1-n, m+k, 1; m+2, m+k+l; 1, -1) + \\ &\quad + \frac{B(m+k, n)}{B(m, n)B(k, l)k} G_{1,0}^{2,1}(k, 1-l, m+k, 1; k+1, m+k+n; 1, -1). \end{aligned}$$

Заметим, что в теореме 1 аналитические результаты выражаются через интегральную показательную функцию

$$\text{Ei}(x) = - \int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt,$$

а в теореме 2 — через бета-функцию $B(m, n)$ и обобщенную гипергеометрическую функцию гауссовского типа

$$G_{1,0}^{2,1}(\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta'_1; \gamma, \delta_1; x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(\alpha)_{i+j} (\beta_1)_i (\beta_2)_i (\beta'_1)_j}{(\gamma)_{i+j} (\delta_1)_i} \frac{x^i y^j}{i! j!},$$

где $(\alpha)_i = \alpha(\alpha + 1) \cdots (\alpha + i - 1)$, $(\alpha)_0 = 1$.

Зависимость результатов от специальных функций делает затруднительным численное исследование моделей и создает предпосылки для создания отдельного программного комплекса, реализующего вычислительную составляющую задачи для всевозможных комбинаций из вырожденного (D), показательного (M) и эрланговского (E) распределений для задач теории массового обслуживания и равномерного (R) и бета-распределения (B) для задач теории надежности. Все аналитические результаты можно найти в книге [1].

3 Основные особенности и структура программного комплекса

Описываемый в данном разделе УИПК BMSRT можно найти на сайте Института проблем информатики ФИЦ ИУ РАН по адресу <http://www.ipiran.ru/tmo/calculations/bmsrt.php>. Данный УИПК состоит из нескольких независимых вычислительных модулей, объединенных модулем вызова соответствующих интерфейсов. Остановимся более подробно на структуре УИПК.

Модули имеют следующие названия и назначения:

- модуль внешнего интерфейса BMSRT_SP (от Bayesian Mass Service and Reliability Theory — Software Package / байесовская теория массового обслуживания и надежности — программный пакет) осуществляет запуск одного из перечисленных ниже вычислительных модулей;
- модуль BMST_DC (от Bayesian Mass Service Theory — Distributions Characteristics / байесовская теория массового обслуживания — характеристики распределений) осуществляет вычисление вероятностных характеристик загрузки системы ρ и вероятности «непотери» вызова π ;
- модуль BMST_DD (от Bayesian Mass Service Theory — Defective Distributions / байесовская теория массового обслуживания — несобственные распределения) позволяет вычислять значения «дефектов» и квантилей несобственных распределений средней длины очереди N ;
- модуль BMST_T (от Bayesian Mass Service Theory — Tabulator / байесовская теория массового обслуживания — табулятор) позволяет создавать электронные таблицы в формате Txt и L^AT_EX для вероятностных характеристик

моделей в теории массового обслуживания для облегчения и визуализации процесса исследования;

- модуль BRT_MR (от Bayesian Reliability Theory — Mean Reliability / байесовская теория надежности — средняя надежность) отвечает за вычисление и табулирование значений средней надежности для моделей в теории надежности.

На рис. 1–5 приведены примеры окон интерфейса каждого из описанных модулей.

Каждый вычислительный модуль, по сути, представляет собой интерфейс между пользователем и ядром УИПК. Ядро УИПК обеспечивает вычислительные возможности для всех характеристик, описанных в предыдущем разделе. Для всевозможных комбинаций априорных распределений байесовских моделей как теории массового обслуживания, так и теории надежности ядро включает все необходимые функции, а также блок проверки входных параметров на корректность и блок построения таблиц.

Схема обмена данными между интерфейсами вычислительных модулей и ядром показана на рис. 6 на примере модуля BMST_DC.

Пользователю предлагается выбрать вид априорного распределения для параметров λ и μ и соответствующие параметры распределений. В зависимости от задачи, решаемой модулем, вводится параметр x для вычисления значения функции распределения, плотности и интегральной показательной функции и параметр q — уровень квантили x_q несобственного распределения средней длины очереди N .

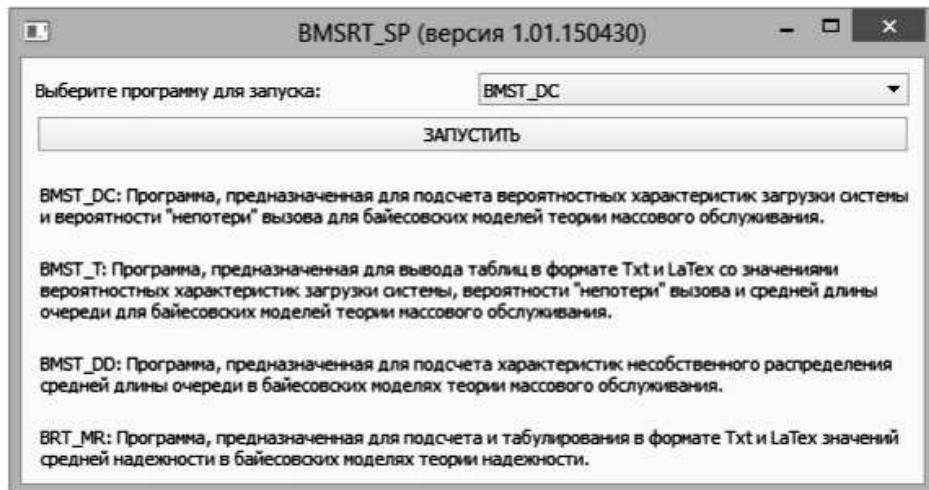


Рис. 1 Окно интерфейса модуля BMSRT_SP

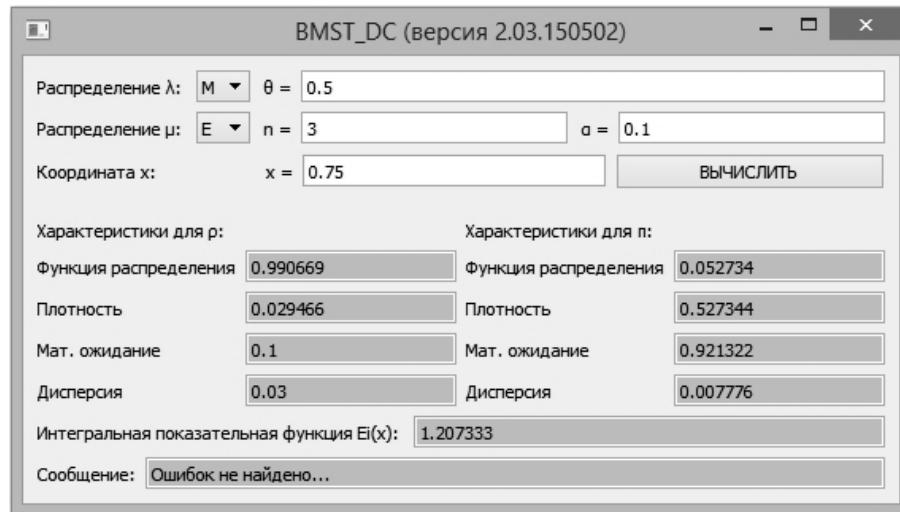


Рис. 2 Окно интерфейса модуля BMST_DC

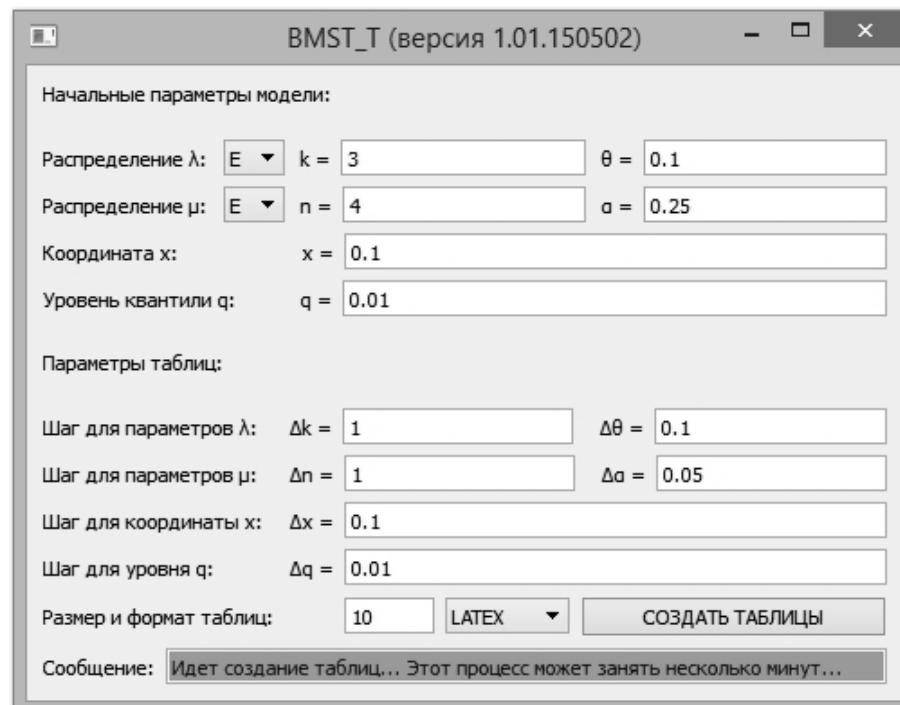


Рис. 3 Окно интерфейса модуля BMST_T

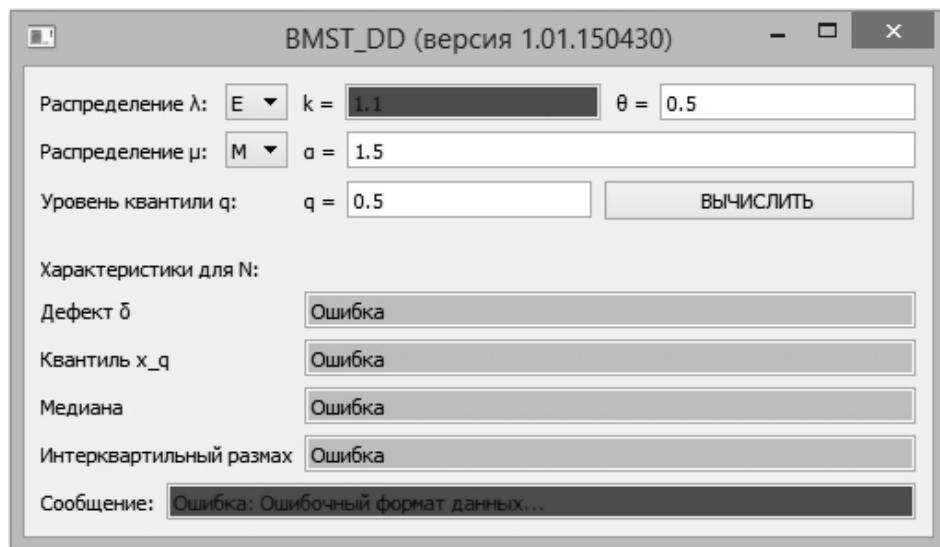


Рис. 4 Окно интерфейса модуля BMST_DD

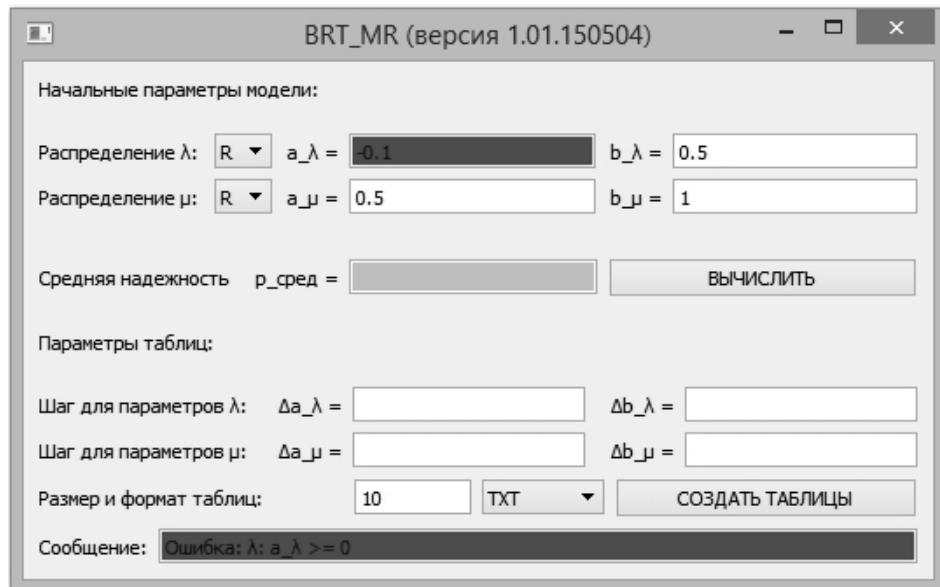
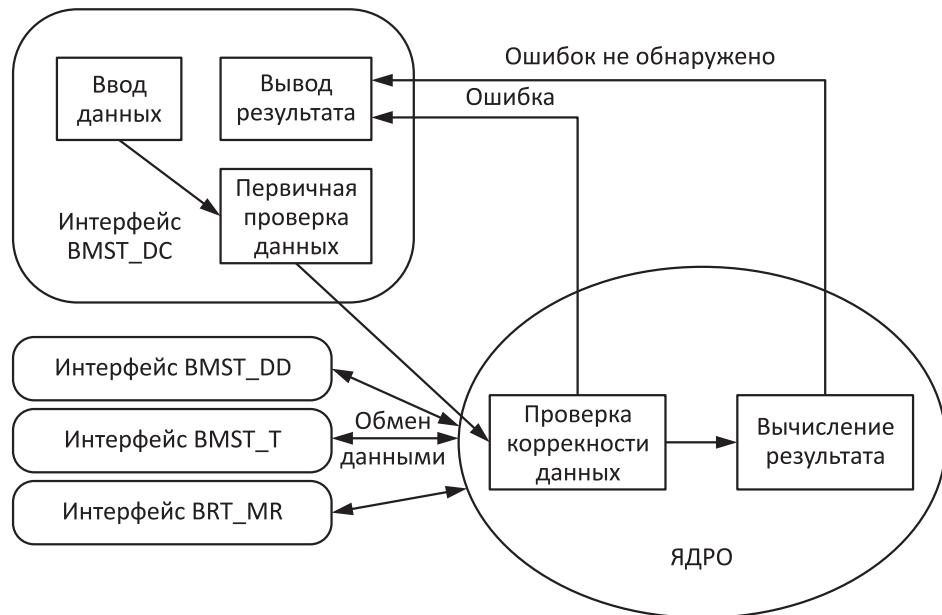


Рис. 5 Окно интерфейса модуля BRT_MR

**Рис. 6** Схема обмена данными в УИПК BMSRT

После ввода данных пользователя и команды на выполнение (осуществляется кнопками «Вычислить» или «Создать таблицы») интерфейсом осуществляется первичная проверка данных на уровне заполненности всех необходимых полей ввода и принадлежности параметров допустимым типам (например, первый параметр эрланговского распределения должен быть целым числом). В случае возникновения ошибки в окне «Сообщение» выдается соответствующее уведомление (см. рис. 4). Если все данные имеют допустимые типы, они передаются в ядро для проверки на адекватность поставленной задаче. При возникновении ошибки на этом шаге в окне «Сообщение» появляется требование исправить текущие параметры (см. рис. 5). В случае корректности введенных данных производится операция счета и вывода результата (или таблицы). Пример успешного выполнения задачи можно увидеть на рис. 2.

Модули BMST_T и MRT_MR имеют возможность сохранять результаты счета в виде таблиц формата Txt и L^AT_EX. Поскольку многие из параметров исследуемых распределений зависят от специальных функций, таких как интегральная показательная функция и обобщенная гипергеометрическая функция двух переменных, время счета для формирования таблиц может занимать некоторое (зачастую продолжительное) время. Для удобства пользователя во время формирования результата в окне «Сообщение» выводится уведомление о работе программы (см. рис. 3).

Модули, позволяющие сохранять результаты в виде таблиц, имеют дополнительные поля ввода данных. Под «шагом изменения параметра» понимается число, прибавляемое к текущему значению параметра при каждой следующей итерации формирования поля таблицы. Поскольку количество основных параметров в задаче может достигать шести (плюс шесть значений «шага»), отследить всевозможные некорректные комбинации значений достаточно сложно. Перед формированием таблиц ядро УИПК проводит проверку на корректность «шага» и в случае обнаружения проблемы выдает соответствующее сообщение. Но в некоторых случаях некорректность введенного шага приводит к невозможности вычисления требуемой характеристики при некоторой частной комбинации параметров (например, если первый параметр равномерного распределения оказывается больше второго или исследуемая характеристика при данной комбинации параметров вообще не существует). В этом случае в текущее место в таблице заносится код ошибки «Err».

Пример сформированной в формате L^AT_EX таблицы можно увидеть на рис. 7.

Все таблицы сохраняются в поддиректорию «TABLES/» и имеют унифицированный формат имени «X-Y_tables.Z», где X соответствует коду распределения λ , Y — коду распределения параметра μ , а Z — расширение txt для таблиц в текстовом формате или tex для таблиц в формате L^AT_EX.

Кроме того, каждый вычислительный модуль снабжен файлом инициализации «M.ini.txt», где M — имя модуля. В этом файле собраны дополнительные переменные, которые могут быть полезны исследователю при работе с УИПК. Основные из этих переменных: «accuracy_wd» и «accuracy_tb», которые задают число знаков после запятой при выводе результата соответственно на экран и в таблицу. Для удобства пользователя значения переменныхчитываются из

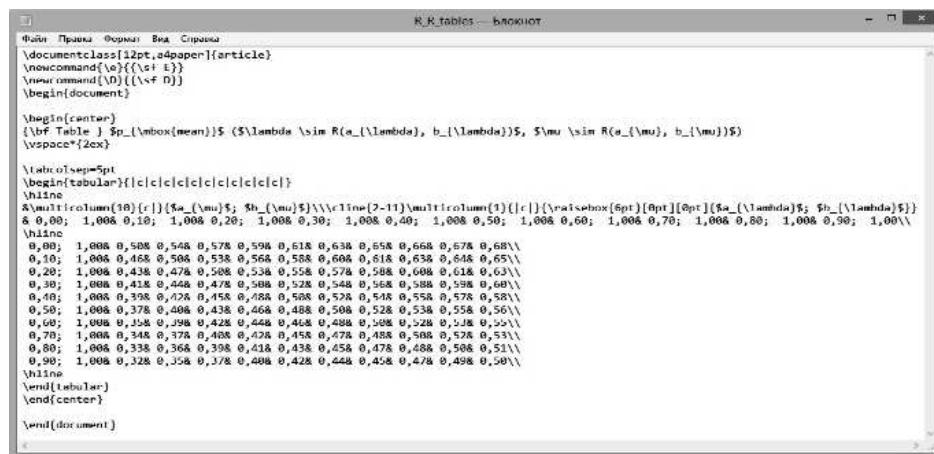


Рис. 7 Пример таблицы в формате L^AT_EX

файлов инициализации при каждой команде на счет, поэтому при необходимости можно менять их, не выходя из программы.

Учебно-исследовательский программный комплекс BMSRT написан на языке C++ в кроссплатформенной свободной интегрированной среде разработки Qt Creator, что позволяет с легкостью подключать новые аналитические модули и расширять возможность применения в различных операционных системах. В настоящее время УИПК ориентирован на функционирование в ОС Windows 8, но ведется активная работа по расширению возможностей комплекса, включая разработку новых математических моделей, методов и подходов.

Литература

1. Кудрявцев А. А., Шоргин С. Я. Байесовские модели в теории массового обслуживания и надежности. — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2015. 76 с.

Поступила в редакцию 28.05.15

SOFTWARE COMPLEX FOR ANALYSIS OF BAYESIAN MODELS IN QUEUEING AND RELIABILITY THEORIES

A. A. Kudryavtsev^{1,2}

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

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

Abstract: This work contains the description of the educational and research software complex intended for analysis of computing aspects of research of Bayesian models in the queueing theory and the reliability theory. The complex carries out calculation of various probabilistic characteristics of system loading parameter, “not loss” call probability and average length of queue, such as the distribution function, density, the moments and quantiles, for models in the queueing theory (for a set of *a priori* distributions of parameters of the input flow and service), and also calculation of average reliability of the complex modified system for models in the reliability theory (for a set of *a priori* distributions of average coefficient of “efficiency” and “defectiveness” of the device correcting errors in the system). Some analytical results are given showing the idea of the tasks solved by the software complex. The detailed description of the structure of the program complex with examples of various features of functioning is given.

Keywords: information and communication systems; complex modified systems; mass service theory; reliability theory; Bayesian approach; software complex

DOI: 10.14357/08696527150316

Acknowledgments

This work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant No. 14-11-00397).

References

1. Kudryavtsev, A. A., and S. Ya. Shorgin. 2015. *Bayesovskie modeli v teorii massovogo obsluzhivaniya i nadezhnosti* [Bayesian models in queueing and reliability theories]. Moscow: FIC IU RAN. 76 p.

Received May 28, 2015

Contributor

Kudryavtsev Alexey A. (b. 1978) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; nubigena@mail.ru

ОБ АВТОРАХ

Адамович Игорь Михайлович (р. 1934) — кандидат технических наук, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Веревкин Геннадий Федорович (р. 1934) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Волков Олег Игоревич (р. 1964) — ведущий программист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Гилязов Руслан Раджабович (р. 1989) — младший научный сотрудник факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М. В. Ломоносова

Гридин Владимир Николаевич (р. 1944) — доктор технических наук, научный руководитель Центра информационных технологий в проектировании Российской академии наук (ЦИТП РАН)

Грушо Александр Александрович (р. 1946) — доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Николай Александрович (р. 1982) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Дулин Сергей Константинович (р. 1950) — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО «НИИАС»); старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Евдокимов Иван Александрович (р. 1985) — младший научный сотрудник Центра информационных технологий в проектировании Российской академии наук (ЦИТП РАН)

Зарядов Иван Сергеевич (р. 1981) — кандидат физико-математических наук, доцент Российского университета дружбы народов

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

Ильин Владимир Дмитриевич (р. 1937) — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Ионенков Юрий Сергеевич (р. 1956) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Карпухин Евгений Олегович (р. 1987) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра информационных технологий в проектировании Российской академии наук (ЦИТП РАН)

Кириков Игорь Александрович (р. 1955) — кандидат технических наук, директор Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Киселев Эдуард Васильевич (р. 1938) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Колесников Александр Васильевич (р. 1948) — доктор технических наук, профессор кафедры телекоммуникаций Российского государственного университета имени Иммануила Канта; старший научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Косарик Валерий Валентинович (р. 1970) — научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кудрявцев Алексей Андреевич (р. 1978) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Листопад Сергей Викторович (р. 1984) — кандидат технических наук, научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Лукьянов Геннадий Викторович (р. 1952) — кандидат военных наук, доцент; заведующий сектором Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Мейханаджян Лусине Акобовна (р. 1990) — аспирант Российского университета дружбы народов

Милованова Татьяна Александровна (р. 1977) — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Российского университета дружбы народов

Никишин Дмитрий Александрович (р. 1976) — кандидат технических наук, заведующий сектором Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук
Попова Мария Сергеевна (р. 1994) — студентка Московского физико-технического института

Разумчик Ростислав Валерьевич (р. 1984) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; доцент Российского университета дружбы народов

Розенберг Игорь Наумович (р. 1965) — доктор технических наук, профессор, первый заместитель директора Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО «НИИАС»)

Румовская София Борисовна (р. 1985) — программист 1-й категории Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Синицын Игорь Николаевич (р. 1940) — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Стрижов Вадим Викторович (р. 1967) — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

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

Тимонина Елена Евгеньевна (р. 1952) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Уманский Владимир Ильич (р. 1954) — доктор технических наук, генеральный директор ЗАО «ИнтехГеоТранс»

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

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

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

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

Тематика журнала охватывает следующие направления:

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

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

Публикация не должна нарушать закон об авторских правах.

Направляя рукопись в редакцию, авторы сохраняют все права собственников данной рукописи и при этом передают учредителям и редколлегии неисключительные права на издание статьи на русском языке (или на языке статьи, если он отличен от русского) и на ее распространение в России и за рубежом. Авторы должны предоставить в редакцию письмо в следующей форме:

Соглашение о передаче права на публикацию:

«Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи «. . .», передаем учредителям и редколлегии журнала «Системы и средства информатики» неисключительное право опубликовать данную рукопись статьи на русском языке как в печатной, так и в электронной версиях журнала. Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает авторских прав других лиц или организаций, а также не содержит сведений, запрещенных к опубликованию в открытой печати.

Подписи авторов: (ф. и. о., дата, адрес)».

Это соглашение может быть предоставлено в бумажном виде или в виде отсканированной копии (с подписями авторов).

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

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

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

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

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

5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редактуре должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или L^AT_EX (.tex), дополнительно — в формате .pdf, на дискете, лазерном диске или электронной почтой. Предоставление бумажной рукописи необязательно.
7. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки.

Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху и снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3.

Основной текст: стиль — «Обычный», шрифт — Times New Roman, размер — 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине.

Рекомендуемый объем рукописи — не свыше 20 страниц указанного формата.

Сокращения слов, помимо стандартных, не допускаются. Допускается минимальное количество аббревиатур.

Все страницы рукописи нумеруются.

Шаблоны примеров оформления представлены в Интернете:

<http://www.ipiran.ru/publications/collected/template.doc>

8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:

- название статьи;
- Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
- место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
- сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_rus/authors.asp и
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_eng/authors.asp;
- аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
- ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами.
- источники финансирования работы (ссылки на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.).

9. Требования к спискам литературы.

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

Списки литературы представляются в двух вариантах:

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

Необходимо для составления списка “References” пользоваться размещенной на сайте <http://www.translit.ru/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу, при этом в закладке «варианты...» следует выбрать опцию BNG.

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

Примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”:

Описание статьи из журнала:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S10231935080077.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Описание материалов конференций:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primenением hidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povышeniya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonants, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Описание переводной книги (в списке литературы к русскоязычной части необходимо указать: / Пер. с англ. — после названия книги, а в конце ссылки указать оригинал книги в круглых скобках):

1. В русскоязычной части:

Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. Vibration problems in engineering. — 4th ed. — N.Y.: Wiley, 1974. 521 p.)

2. В англоязычной части:

Timoshenko, S. P., D. H. Young, and W. Weaver. 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. N.Y.: Wiley. 521 p.

Описание неопубликованного документа:

Latypov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004. Geology and production (NGT GiD). Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198. (In Russian, unpubl.)

Описание интернет-ресурса:

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov, V. I. 2003. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyy tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. D.Sc. Diss. Moscow. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya informacionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

Описание ГОСТа:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow: Standardinform Publs. 10 p.

Описание патента:

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoj samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

10. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.
11. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:
 - указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
 - использовать attach (присоединение);
 - в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.
12. Журнал «Системы и средства информатики» является некоммерческим изданием. Плата за публикацию не взимается, гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции журнала «Системы и средства информатики»:

Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ФИЦ ИУ РАН

Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05

e-mail: rust@ipiran.ru (Сейфулль-Мулюков Рустем Бадриевич)

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

Requirements for manuscripts submitted to Journal “Systems and Means of Informatics”

Journal “Systems and Means of Informatics” publishes theoretical, review, and discussion articles on the research and development in the field of information technology.

The journal is published in Russian. By a special decision of the editorial board, some articles can be published in English.

Topics covered include the following areas:

- information and communication systems and tools of their design;
- architecture and software of computational complexes and networks; and
- methods and tools of information protection.

1. The Journal publishes original articles which have not been published before and are not intended for simultaneous publication in other editions. An article submitted to the Journal must not violate the Copyright law. Sending the manuscript to the Editorial Board, the authors retain all rights of the owners of the manuscript and transfer the nonexclusive rights to publish the article in Russian (or the language of the article, if not Russian) and its distribution in Russia and abroad to the Founders and the Editorial Board. Authors should submit a letter to the Editorial Board in the following form:

Agreement on the transfer of rights to publish:

“We, the undersigned authors of the manuscript “. . . ,” pass to the Founder and the Editorial Board of the Journal “Systems and Means of Informatics” the nonexclusive right to publish the manuscript of the article in Russian (or in English) in both print and electronic versions of the Journal. We affirm that this publication does not violate the Copyright of other persons or organizations.

Author(s) signature(s): (name(s), address(es), date).”

This agreement should be submitted in paper form or in the form of a scanned copy (signed by the authors).

The Editorial Board has the right to request from the authors an official expert conclusion that the submitted article has no classified data prohibited for publication.

2. A submitted article should be attached with **the data on the author(s)** (see item 8). If there are several authors, the contact person should be indicated who is responsible for correspondence with the Editorial Board and other authors about revisions and final approval of the proofs.
3. The Editorial Board of the Journal examines the article according to the established reviewing procedure. If authors receive their article for correction after reviewing, it does not mean that the article is approved to be published. The corrected article should be sent to the Editorial Board for the subsequent review and approval.
4. The decision on the article publication or its rejection is communicated to the authors. The Editorial Board may also send the reviews on the submitted articles to the authors. Any discussion upon the rejected articles is not possible.
5. The edited articles will be sent to the authors for proofread. The comments of the authors to the edited text of the article should be sent to the Editorial Board as soon as possible.

6. The manuscript of the article should be presented electronically in the MS WORD (.doc or .docx) or L^AT_EX (.tex) formats, and additionally in the .pdf format. All documents may be sent by e-mail or provided on a CD or diskette. A hard copy submission is not necessary.

7. The recommended typesetting instructions for manuscript.

Pages parameters: format A4, portrait orientation, document margins (cm): left — 2.5, right — 1.5, above — 2.0, below — 2.0, footer 1.3.

Text: font —Times New Roman, font size — 14, paragraph indent — 0.5, line spacing — 1.5, justified alignment.

The recommended manuscript size: not more than 20 pages of the specified format.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site:

<http://www.ipiran.ru/publication/collected/template.doc>

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_rus/authors.asp and
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_eng/authors.asp;

- abstract (not less than 100 words) both in Russian and in English. Abstract is a short summary of the article that can be published separately. The abstract is the main source of information on the article and it could be included in leading information systems and data bases. The abstract in English has to be an original text and should not be an exact translation of the Russian one. Good English is required. In abstracts, avoid references and formulae.

- Indexing is performed on the basis of keywords. The use of keywords from the internationally accepted thematic Thesauri is recommended.

Important! Keywords must not be sentences.

- Acknowledgments.

9. References. Russian references have to be presented both in English translation and in Latin transliteration (refer <http://www.translit.ru>, option BGN).

Please take into account the following examples of Russian references appearance:

Article in journal:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Journal article in electronic format:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic

exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Conference proceedings:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povышeniya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Books and other monographs:

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonants, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Dissertation and Thesis:

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya informacionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

State standards and patents:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. M.: Standardinform Publs. 10 p.

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoj samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

References in Latin transcription are presented in the original language.

References in the text are numbered according to the order of their first appearance; the number is placed in square brackets. All items from the reference list should be cited.

10. Manuscripts and additional materials are not returned to Authors by the Editorial Board.
11. Submissions of files by e-mail must include:
 - the journal title and author's name in the "Subject" field;
 - an article and additional materials have to be attached using the "attach" function;
 - an electronic version of the article should contain the file with the text and a separate file with figures.
12. "System and Means of Informatics" journal is not a profit publication. There are no charges for the authors as well as there are no royalties.

Editorial Board address:

FRC CSC RAS, 44, block 2, Vavilov Str., Moscow 119333, Russia

Ph.: +7 (499)135 8692, Fax: +7 (495)930 45 05

e-mail: rust@ipiran.ru (to Prof. Rustem Seyful-Mulyukov)

http://www.ipiran.ru/english/journal_systems.asp

SYSTEMS AND MEANS OF INFORMATICS (СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ)

SCIENTIFIC JOURNAL

Volume 25 No.3 Year 2015

Editor-in-Chief and Chair of Editorial Council
Academician I. A. Sokolov

I N T H I S I S S U E:

APPLICATIONS OF ORTHOGONAL EXPANSIONS FOR ANALYTICAL MODELING
OF MULTIDIMENSIONAL DISTRIBUTIONS IN STOCHASTIC
SYSTEMS ON MANIFOLD

I. N. Sinitsyn 4

MOMENTS METHODS FOR ANALYTICAL MODELING
OF STOCHASTIC SYSTEMS ON MANIFOLDS

I. N. Sinitsyn 24

ON THE METHOD OF CALCULATING THE STATIONARY DISTRIBUTION
IN THE FINITE TWO-CHANNEL SYSTEM WITH ORDERED INPUT

I. S. Zaryadov, L. A. Meykhanadzhyan, T. A. Milovanova, and R. V. Razumchik 44

BUILDING SUPERPOSITION OF DEEP LEARNING NEURAL NETWORKS
FOR SOLVING THE PROBLEM OF TIME SERIES CLASSIFICATION

M. S. Popova and V. V. Strijov 60

POSSIBILITIES OF SECURE ARCHITECTURE CREATION FOR DYNAMICALLY
CHANGING INFORMATION SYSTEMS

A. A. Grusho, N. A. Grusho, E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin 78

PROBLEMS OF INTERACTION OF THE MALICIOUS CODE AND PROTECTION
PROGRAMS IN ARCHITECTURE OF MODERN OPERATING SYSTEMS

R. R. Giliazov and A. A. Grusho 94

GEOGRAPHICAL STANDARDS TO ENSURE GEOINTEROPERABILITY

S. Dulin, I. Rozenberg, and V. Umanskiy 109

VIRTUAL HETEROGENEOUS COLLECTIVES FOR SUPPORTING
DECISION-MAKING

I. A. Kirikov, A. V. Kolesnikov, S. V. Listopad, and S. B. Rumovskaya 126