

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. Стемпковский
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. Козмидиади 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, 2016

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

Журнал входит в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)
Журнал включен в базу данных CrossRef (систему DOI — Digital Object Identifier),

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

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

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

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

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 26 № 3 Год 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое обеспечение субоптимальной нормальной фильтрации в стохастических системах со сложными дробно-рациональными нелинейностями

**И. Н. Синицын, В. И. Синицын, И. В. Сергеев,
Э. Р. Корепанов, В. В. Белоусов, В. С. Шоргин,
Е. С. Агафонов**

4

Символьное аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными бесселевыми нелинейностями дробного порядка

И. Н. Синицын, Э. Р. Корепанов, В. В. Белоусов

26

Отказоустойчивый самосинхронный последовательно-параллельный порт: варианты реализации

**Ю. А. Степченков, А. Н. Каменских, С. Ф. Тюрин,
Ю. Г. Дьяченко**

48

Защита бизнес-логики от атак нулевого дня

А. А. Грушо, Д. В. Смирнов

60

Архитектурные уязвимости распределенных информационно-вычислительных систем

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

74

Безопасная автоматическая реконфигурация облачных вычислительных сред

**А. А. Грушо, М. И. Забежайло, А. А. Зацаринный,
В. О. Писковский**

83

Концептуальная модель виртуальных гетерогенных коллективов для поддержки принятия групповых решений

**И. А. Кириков, А. В. Колесников, С. Б. Румовская,
А. В. Барзенков, Е. В. Петренко**

93

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 26 № 3 Год 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Смеси нормальных законов в задаче поиска опорных точек по сигналу миограммы

T. В. Захарова, М. М. Подлесный **106**

Некоторые аспекты оценки эффективности автоматизированных информационных систем на различных стадиях их жизненного цикла

A. А. Зацаринный, Ю. С. Ионенков **122**

Сегментирование информационно-технологической инфраструктуры ситуационного центра по признаку контуров безопасности

A. А. Зацаринный, В. И. Королёв **136**

Технология распределенного автоматизированного анализа исторических текстов

И. М. Адамович, О. И. Волков **148**

Информатика в академической библиотеке

C. А. Власова, Н. Е. Каленов **162**

Объекты научного авторства и оценка их значимости

В. Д. Ильин **179**

Об обучении информационной и медиаграмотности в российских начальных школах

Д. А. Богданова **189**

Об авторах **200**

Правила подготовки рукописей статей **203**

Requirements for manuscripts **207**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СУБОПТИМАЛЬНОЙ НОРМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СО СЛОЖНЫМИ ДРОБНО-РАЦИОНАЛЬНЫМИ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ*

*И. Н. Синицын¹, В. И. Синицын², И. В. Сергеев³, Э. Р. Корепанов⁴,
В. В. Белоусов⁵, В. С. Шоргин⁶, Е. С. Агафонов⁷*

Аннотация: Представлено алгоритмическое и инструментальное программное обеспечение модуля StS-CFRN.Filter, входящего в библиотеку StS-Filter. Модуль позволяет синтезировать дифференциальные и дискретные нормальные субоптимальные фильтры (НСОФ) для практически важного класса стохастических систем (СтС), когда, во-первых, уравнения наблюдения не содержат пуассоновского шума, а во-вторых, коэффициент при винеровском шуме не зависит от состояния. Приведены тестовые примеры, иллюстрирующие эффективность фильтров для задач оперативной оценки надежности и безопасности технических систем.

Ключевые слова: алгоритмическое обеспечение; дробно-рациональная нелинейность (ДРН); инструментальное программное обеспечение; метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); модуль StS-CFRN.Filter; нормальный субоптимальный фильтр (НСОФ); оптический интерферометр

DOI: 10.14357/08696527160301

1 Введение

В [1–5] описаны методы и средства аналитического моделирования нормальных стохастических процессов (НСтП) для дифференциальных СтС, в том числе

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

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

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

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

⁴Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, tboxekogorpanov@ipiran.ru

⁵Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, vbelousov@ipiran.ru

⁶Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, vshorgin@ipiran.ru

⁷Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, eagafonov@ipiran.ru

и на многообразиях (МСтС). В [6] для СтС со сложными дробно-рациональными нелинейностями (СДРН) даны типовые представления дробно-рациональных функций (ДРФ) и соответствующих СДРН, получены уравнения методов нормальной аппроксимации (МНА) и статистической линеаризации (МСЛ), представлено алгоритмическое обеспечение МНА (МСЛ) для СтС с СДРН и тестовые примеры. В [7] дано развитие [6] на случай непрерывных и дискретных СтС. Особое внимание уделено алгоритмическому и программному обеспечению модуля StS-CFRN.Analysis. Основываясь на [8], рассмотрим алгоритмическое и инструментальное программное обеспечение модуля StS-CFRN.Filter (2016) синтеза НСОФ для нелинейных гауссовских и негауссовских СтС с СДРН в предположении, что уравнения наблюдения не содержат пуассоновского шума, а коэффициент при винеровском шуме не зависит от состояния.

2 Дробно-рациональные нелинейности и их статистическая линеаризация

Как известно [6], скалярная дробно-рациональная нелинейность (ДРН) $Z = \varphi^{\text{ДРН}}(Y)$ представима в виде отношения двух полиномов $P^+(y)$ и $P^-(y)$:

$$R^{\text{ДРН}}(y) = \frac{P^-(y)}{P^+(y)}.$$

Для правильной ДРН степень числителя $P^-(y)$ не больше степени знаменателя $P^+(y)$. В общем случае скалярную ДРН можно однозначно представить в виде полинома $P(y)$ и правильной ДРН:

$$\frac{P^-(y)}{P^+(y)} = P(y) + \frac{P_1^-(y)}{P^+(y)}. \quad (1)$$

Основные свойства правильных ДРН описаны в [6]. В [7, П4] приведены примеры сложных нелинейностей, приводимых к СДРН.

Скалярная ДРН векторного аргумента определяется как отношение конечных сумм:

$$R^{\text{ДРН}}(y_1, \dots, y_n) = \frac{\sum_{k_1, \dots, k_n} a_{k_1, \dots, k_n} (y_1)^{k_1} \dots (y_n)^{k_n}}{\sum_{i_1, \dots, i_n} b_{i_1, \dots, i_n} (y_1)^{i_1} \dots (y_n)^{i_n}}. \quad (2)$$

В случае векторных и матричных СДРН имеют место соответствующие формулы (1) для компонент.

Рассмотрим статистическую линеаризацию по Казакову [9, 10] ДРН при несимметричном ($m_y \neq 0$) гауссовском стохастическом входном сигнале Y_t вида

$$Y_t = Y(t) = m_y + Y_t^0, \quad (3)$$

где m_y — математическое ожидание; $Y_t^0 = Y^0(t) = Y(t) - m_y$. В соответствии с МСЛ зависимость $Z_t = \varphi^{\text{ДРН}}(Y_t, t)$ аппроксимируется следующим выражением:

$$Z_t = \varphi_0^{\text{ДРН}}(m_y, D_y, t) + k_1^{\text{ДРН}}(m_y, D_y, t) Y_t^0.$$

Здесь D_y — дисперсия; $\varphi_0^{\text{ДРН}}$ и $k_1^{\text{ДРН}}$ — коэффициенты статистической линеаризации, зависящие от m_y и D_y и определяемые по формулам:

$$\varphi_0^{\text{ДРН}} = \varphi_0^{\text{ДРН}}(m_y, D_y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^{\text{ДРН}}(\eta, t) e^{-(\eta-m_y)^2/(2D_y)} d\eta; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} k_1^{\text{ДРН}} &= k_1^{\text{ДРН}}(m_y, D_y, t) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} (\eta - m_y) \varphi^{\text{ДРН}}(\eta, t) e^{-(\eta-m_y)^2/(2D_y)} d\eta = \frac{\partial \varphi_0^{\text{ДРН}}(m_y, D_y, t)}{\partial m_y}. \end{aligned} \quad (5)$$

В зависимости от аналитической формы представления СДРН различают следующие методы вычисления коэффициентов статистической линеаризации [6]: степенные разложения; многочленные приближения; дробно-рациональные приближения; разложения в цепные дроби; асимптотические формулы и приближения; рекуррентные соотношения.

Ограничимся разработкой алгоритмов фильтрации, основанных на степенных разложениях. При этом воспользуемся следующими соотношениями для $\varphi(y, t)$:

$$\varphi^{\text{ДРН}}(y, t) = \sum_{h=0}^{\infty} \left(\rho_{2h}^{\text{ДРН}} y^{2h} + \rho_{2h+1}^{\text{ДРН}} y^{2h+1} \right) \quad (6)$$

и для коэффициентов статистической линеаризации (4) и (5):

$$\begin{aligned} \varphi_0^{\text{ДРН}}(m_y, D_y, t) &= \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi D_y}} \exp \left[- \left(\frac{m_y^2}{2D_y} \right) \right] \sum_{h=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \left\{ \rho_{2h}^{\text{ДРН}} \left[\left(\frac{m_y}{D_y} \right)^{2l} \frac{(h+l)!}{2^{h+l} c^{h+l+1}} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \rho_{2h+1}^{\text{ДРН}} \left[\left(\frac{m_y}{D_y} \right)^{2l+1} \frac{(h+l)!!}{2c^{h+l+1}} \sqrt{\frac{2\pi}{c}} \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$k_1^{\text{ДРН}}(m_y, D_y, t) = \varphi_0^{y\varphi}(m_y, D_y, t) - m_y \varphi_0^{\text{ДРН}} \quad (m_y \neq 0);$$

$$k_1^{\text{ДРН}}(0, D_y) = \varphi_0^{y\varphi}(0, D_y) \quad (m_y = 0).$$

Здесь учтены следующие степенные разложения и определенные интегралы, а также введены обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (e^x + e^{-x}) &= \sum_{\gamma=0}^{\infty} \frac{x^{2\gamma}}{(2\gamma)!}; \quad \frac{1}{2} (e^x - e^{-x}) = \sum_{\gamma=0}^{\infty} \frac{x^{2\gamma+1}}{(2\gamma+1)!}; \\ \int_0^{\infty} t^{2n+1} e^{-ct^2/2} dt &= \frac{n!}{2^n c^{n+1}}; \quad \int_0^{\infty} t^{2n} e^{-ct^2/2} dt = \frac{(2n-1)!!}{2c^n} \sqrt{\frac{2\pi}{c}}; \\ c &= \frac{1}{2D_y}; \quad \varphi_0^{y\varphi}(m_y, D_y, t) = M_N \left[Y_t \varphi^{\text{ДРН}} \right]; \\ M_N(\cdot) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} (\cdot) \exp \left[-\frac{(\eta - m_y)^2}{2D_y} \right] dy. \end{aligned}$$

3 Алгоритмическое обеспечение синтеза нормальных дифференциальных субоптимальных фильтров

Пусть векторный стохастический процесс (СтП) $[X_t^T Y_t^T]^T$ определяется системой векторных стохастических дифференциальных уравнений Ито [8, 11]:

$$\begin{aligned} dX_t &= \varphi(X_t, Y_t, \Theta, t) dt + \psi'(X_t, Y_t, \Theta, t) dW_0 + \\ &\quad + \int_{R_0^q} \psi''(X_t, Y_t, \Theta, t, v) P^0(dt, dv), \quad X(t_0) = X_0; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dY_t &= \varphi_1(X_t, Y_t, \Theta, t) dt + \psi'_1(X_t, Y_t, \Theta, t) dW_0 + \\ &\quad + \int_{R_0^q} \psi''_1(X_t, Y_t, \Theta, t, v) P^0(dt, dv), \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (8) \end{aligned}$$

Здесь $Y_t = Y(t)$ — n_y -мерный наблюдаемый СтП, $Y_t \in \Delta^y$ (Δ^y — гладкое многообразие наблюдений); $X_t = X(t)$ — n_x -мерный ненаблюдаемый СтП (вектор состояния), $X_t \in \Delta^x$ (Δ^x — гладкое многообразие состояний); $W_0 = W_0(t)$ — n_w -мерный винеровский СтП ($n_w \geq n_y$) интенсивности $\nu_0 = \nu_0(\Theta, t)$; $P^0(\Delta, A) = P(\Delta, A) - \mu_P(\Delta, A)$, $P(\Delta, A)$ представляет собой для любого множества A простой пуассоновский СтП, а $\mu_P(\Delta, A)$ — его математическое ожидание, причем

$$\mu_P(\Delta, A) = \text{MP}(\Delta, A) = \int_{\Delta} \nu_P(\tau, A) d\tau;$$

$\nu_P(\Delta, A)$ — интенсивность соответствующего пуассоновского потока событий, $\Delta = (t_1, t_2]$; интегрирование по v распространяется на все пространство R^q с выколотым началом координат; Θ — вектор случайных параметров размерности n_Θ ; $\varphi = \varphi(X_t, Y_t, \Theta, t)$, $\varphi_1 = \varphi_1(X_t, Y_t, \Theta, t)$, $\psi' = \psi'(X_t, Y_t, \Theta, t)$, $\psi'_1 = \psi'_1(X_t, Y_t, \Theta, t)$ — известные функции, отображающие $R^{n_x} \times R^{n_y} \times R$ соответственно в R^{n_x} , R^{n_y} , $R^{n_x n_w}$, $R^{n_y n_w}$; $\psi'' = \psi''(X_t, Y_t, \Theta, t, v)$ и $\psi''_1(X_t, Y_t, \Theta, t, v)$ — известные функции, отображающие $R^{n_x} \times R^{n_y} \times R^q$ в R^{n_x} и R^{n_y} . Требуется найти оценку \hat{X}_t СтП X_t в каждый момент времени t по результатам наблюдения СтП $Y(\tau)$ до момента t , $Y_{t_0}^t = \{Y(\tau) : t_0 \leq \tau < t\}$.

Предположим, что

- уравнение состояния имеет вид (7);
- уравнение наблюдения (8), во-первых, не содержит пуассоновского шума ($\psi''_1 \equiv 0$), а во-вторых, коэффициент при винеровском шуме ψ'_1 в уравнениях наблюдения не зависит от состояния ($\psi'_1(X_t, Y_t, \Theta, t) = \psi'_1(Y_t, \Theta, t)$).

В этом случае уравнения задачи нелинейной фильтрации имеют следующий вид:

$$dX_t = \varphi(X_t, Y_t, \Theta, t) dt + \psi'(X_t, Y_t, \Theta, t) dW_0 + \int_{R_0^q} \psi''(X_t, Y_t, \Theta, t, v) P^0(dt, dv), \quad X(t_0) = X_0; \quad (9)$$

$$dY_t = \varphi_1(X_t, Y_t, \Theta, t) dt + \psi_1(Y_t, \Theta, t) dW_0, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (10)$$

Как известно [4–8], для любых СтП X_t и Y_t оптимальная оценка \hat{X}^t , минимизирующая средний квадрат ошибки в каждый момент времени t , представляет собой апостериорное математическое ожидание СтП X_t : $\hat{X}_t = \mathbb{M}[X_t | Y_{t_0}^t]$. Чтобы найти это условное математическое ожидание, необходимо знать апостериорное одномерное распределение СтП X_t . При условиях (9) и (10) соответствующие точные фильтрационные уравнения для одномерных плотности и характеристической функции получены в [8, 11]. Необходимость обработки результатов наблюдений в реальном масштабе времени непосредственно в процессе эксперимента привела к появлению ряда приближенных методов оптимальной нелинейной фильтрации, называемых обычно методами *субоптимальной фильтрации* [4, 5, 8]. Простейшим таким методом является МНА апостериорного распределения. Исключительно важное практическое значение имеют квазилинейные фильтры, получаемые с помощью методов эквивалентной линеаризации [4, 5, 8].

Нормальный субоптимальный фильтр для гауссовских систем

Так как нормальное (гауссовское) распределение, аппроксимирующее апостериорное одномерное распределение X_t , полностью определяется математическим ожиданием \hat{X}_t и ковариационной матрицей R_t вектора X_t , то при аппроксимации апостериорного одномерного распределения вектора X_t нормальным распределением все математические ожидания в правых частях формул для $d\hat{X}_t$ и dR_t будут определенными функциями \hat{X}_t , R_t и t . Для гауссовых МСтС ($\psi'' = 0$, $\psi_1'' = 0$) фильтрационные уравнения для НСОФ будут представлять собой стохастические дифференциальные уравнения [8, 11], определяющие \hat{X}_t и R_t :

$$d\hat{X}_t = f(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) dt + \\ + h(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) [dY_t - f^{(1)}(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) dt]; \quad (11)$$

$$dR_t = \left\{ f^{(2)}(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) - \right. \\ \left. - h(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) (\psi_1 \nu_0 \psi_1^T)(Y_t, \Theta, t) h(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t)^T \right\} dt + \\ + \sum_{r=1}^{n_y} \rho_r(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) [dY_r - f_r^{(1)}(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) dt]. \quad (12)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$f = f(\hat{X}_t, Y_t, R_t, t) = M_{\Delta^x}^N [\varphi(Y_t, X_t, \Theta, t)] = \hat{\varphi}; \quad (13)$$

$$f^{(1)} = f^{(1)}(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) = \left\{ f_r^{(1)}(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) \right\} = \\ = M_{\Delta^x}^N [\varphi_1(Y_t, X, \Theta, t)] = \hat{\varphi}_1^T; \quad (14)$$

$$h = h(\hat{X}_t, Y_t, R_t, t) = \left\{ M_{\Delta^x}^N \left[\hat{X}_t \varphi_1(Y_t, X_t, \Theta, t)^T + \psi \nu_0 \psi_1^T(Y_t, X_t, \Theta, t) \right] - \right. \\ \left. - \hat{X}_t f^{(1)}(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t)^T \right\} (\psi_1 \nu_0 \psi_1^T)^{-1}(Y_t, \Theta, t); \quad (15)$$

$$f^{(2)} = f^{(2)}(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t) = M_{\Delta^x}^N \left\{ (X_t - \hat{X}_t) \varphi(Y_t, X_t, \Theta, t)^T + \right. \\ \left. + \varphi(Y_t, X_t, \Theta, t) (X_t^T - \hat{X}_t^T) + \psi \nu_0 \psi^T(Y_t, X_t, \Theta, t) \right\}; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \rho_r = \rho_r \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) &= \mathbf{M}_{\Delta_x}^N \left\{ \left(X_t - \hat{X}_t \right) \left(X_t^T - \hat{X}_t^T \right) a_r (Y_t, X_t, \Theta, t) + \right. \\ &+ \left(X_t - \hat{X}_t \right) b_r (Y_t, X_t, \Theta, t)^T \left(X_t^T - \hat{X}_t^T \right) + \\ &\left. + b_r (Y_t, X_t, \Theta, t) \left(X_t^T - \hat{X}_t^T \right) \right\} \quad (r = 1, \dots, n_y), \quad (17) \end{aligned}$$

где a_r — r -й элемент матрицы-строки $(\varphi_1^T - \hat{\varphi}_1^T)(\psi_1\nu_0\psi_1^T)$, а b_{kr} — элемент k -й строки и r -го столбца $(\psi\nu_0\psi_1^T)(\psi_1\nu_0\psi_1^T)^{-1}$; b_r — r -й столбец матрицы $(\psi\nu_0\psi_1^T)(\psi_1\nu_0\psi_1^T)$, $b_r = [b_{1r} \dots b_{nr}]^T$.

Замечание 1. Число уравнений для апостериорного одномерного распределения определяется по формуле $Q_{\text{МНА}} = n_x + n_x(n_x + 1)/2 = n_x(n_x + 3)/2$.

За начальные значения \hat{X}_t и R_t при интегрировании уравнений (11) и (12), естественно, следует принять условные математическое ожидание и ковариационную матрицу величины X_0 относительно Y_0 :

$$\hat{X}_0 = \mathbf{M}_{\Delta_x}^N [X_0 | Y_0]; \quad R_0 = \mathbf{M}_{\Delta_x}^N \left[\left(X_0 - \hat{X}_0 \right) \left(X_0^T - \hat{X}_0^T \right) | Y_0 \right]. \quad (18)$$

Если нет информации об условном распределении X_0 относительно Y_0 , то начальные условия можно взять в виде $\hat{X}_0 = \mathbf{M}X_0$ и $R_0 = \mathbf{M}(X_0 - \mathbf{M}X_0)(X_0^T - \mathbf{M}X_0^T)$. Если же и об этих величинах нет никакой информации, то начальные значения \hat{X}_t и R_t приходится задавать произвольно.

Нормальный субоптимальный фильтр для негауссовских систем

В основе соответствующих алгоритмов для МСтС (9) и (10) с пуассоновскими шумами в (9) и невырожденной матрицей $\sigma_1 = \psi_1\nu_0\psi_1^T$ лежат уравнения (11) и (12). При этом потребуется ограниченность функций f , $f^{(1)}$, h и ρ_r , определяемых (13)–(15) и (17), и функции

$$\bar{f}^{(2)} = f^{(2)} + \mathbf{M}_{\Delta_x}^N \left[\int_{R_0^q} \psi'' \psi''^T \nu_P(\Theta, t, dv) \right].$$

Для гладких функций φ , φ_1 , ψ' и ψ'_1 и гауссовских МСтС (2) и (3) НСОФ на основе МНА называется просто гауссовским фильтром [4, 6, 7].

Модифицированные нормальные субоптимальные фильтры

Обобщая [8] и повторяя соответствующие выкладки для ненормированного апостериорного одномерного распределения:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_t(x) &\approx \tilde{p}_t^*(x) = \frac{\mu_t}{\sqrt{((2\pi)^n |R_t|)}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(x^T - \hat{X}_t^T \right) R_t^{-1} \left(x - \hat{X}_t \right) \right\}; \\ \tilde{g}_t(\lambda) &\approx \tilde{g}_t^*(\lambda) = \mu_t \exp \left\{ i\lambda^T \hat{X}_t^T - \frac{1}{2} \lambda^T R_t \lambda \right\}, \end{aligned} \quad (19)$$

получаем следующие уравнения НСОФ:

$$\hat{X}_t = \frac{m_t}{\mu_t}; \quad R_t = \frac{\Gamma_t}{\mu_t} - \frac{m_t m_t^T}{\mu_t^2}; \quad (20)$$

$$dm_t = \mu_t f_1 \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) dt + \mu_t h_1 \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) dY_t; \quad (21)$$

$$d\Gamma_t = \mu_t f_2 \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) dt + \mu_t \sum_{r=1}^{n_y} h_{2r} \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) dY_r; \quad (22)$$

$$d\mu_t = \mu_t h_3 \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) dY_t. \quad (23)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= \psi \nu_0 \psi^T; \quad \bar{\sigma}_0 = \sigma_0 + \int_{R_0^q} \psi'' \psi''^T \nu_P(\Theta, t, dv); \\ \sigma_1 &= \psi \nu_0 \psi_1^T; \quad \sigma_2 = \psi_1 \nu_0 \psi_1^T, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где σ_{1s} — s -я строка матрицы σ_1 ; m_t — вектор с компонентами m_{e_1}, \dots, m_{e_n} ; e_n — n -мерный вектор, все компоненты которого равны нулю, кроме s -й, равной 1; Γ_t — матрица с элементами $m_{e_s+e_h}$ ($s, h = 1, \dots, n$). При этом

$$f_1 = f_1 \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) = M_{\Delta_x}^N [\varphi(Y_t, X, \Theta, t)]; \quad (25)$$

$$h_1 = h_1 \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) = M_{\Delta_x}^N [\sigma_1(Y_t, X, \Theta, t) + X \varphi_1(Y_t, X, \Theta, t)]; \quad (26)$$

$$\begin{aligned} f_2 &= f_2 \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) = M_{\Delta_x}^N \left[X \varphi(Y_t, X, \Theta, t)^T + \varphi(Y_t, X, \Theta, t) X^T + \right. \\ &\quad \left. + \bar{\sigma}_0(Y_t, X, R_t, \Theta, t) \right] \sigma_2(Y_t, \Theta, t)^{-1}; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} h_{2r} &= h_{2r} \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) = M_{\Delta_x}^N \left[X X^T a_r(Y_t, X, \Theta, t) + \right. \\ &\quad \left. + X b_r(Y_t, X, \Theta, t)^T + b_r(Y_t, X, \Theta, t) X^T \right] (r = 1, \dots, n_x); \end{aligned} \quad (28)$$

$$h_3 = h_3 \left(\hat{X}_t, Y_t, R_t, \Theta, t \right) = M_{\Delta_x}^N \left[\varphi_1(Y_t, X, \Theta, t)^T \right] \sigma_2(Y_t, \Theta, t)^{-1}. \quad (29)$$

Начальными условиями для (21)–(23) служат

$$m(t_0) = m_0 = \hat{X}_0; \quad \Gamma(t_0) = \Gamma_0 = R_0 + \hat{X}_0 \hat{X}_0^T; \quad \mu(t_0) = 1, \quad (30)$$

где \hat{X}_0 и R_0 — условное математическое ожидание и ковариационная матрица вектора X_0 относительно Y_0 .

Замечание 2. Уравнения НСОФ на основе модифицированного МНА (ММНА) несколько проще, чем соответствующие уравнения на основе МНА при нормированном распределении, хотя и содержат на одно уравнение больше: $Q_{\text{ММНА}} = 1 + n_x(n_x + 3)/2$.

Квазилинейный нормальный субоптимальный фильтр на основе метода статистической линеаризации

Для МСтС (7) и (8) при $\psi' = \psi'(\Theta, t)$, $\psi'' = \psi''(\Theta, t, v)$, $\psi'_1 = \psi'_1(\Theta, t)$ и $\psi''_1 = \psi''_1(\Theta, t, v)$ (т. е. с аддитивными винеровскими и пуассоновскими шумами) уравнения НСОФ проще получаются, если нелинейные функции φ и φ_1 на основе гауссовского (нормального) распределения заменить на статистически линеаризованные [4, 5, 8]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi(X_t, Y_t, \Theta, t) \approx \varphi_0 + k_x^\varphi (X_t - m_t^x) + k_y^\varphi (Y_t - m_t^y); \\ \varphi_1 &= \varphi_1(X_t, Y_t, \Theta, t) \approx \varphi_{10} + k_x^{\varphi_1} (X_t - m_t^x) + k_y^{\varphi_1} (Y_t - m_t^y), \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

а затем использовать уравнения линейной фильтрации [4, 5, 8]. Входящие в (31) коэффициенты статистической линеаризации зависят от математических ожиданий, дисперсий и ковариаций:

$$Z_t = \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \end{bmatrix}; \quad m_t^z = \begin{bmatrix} m_t^x \\ m_t^y \end{bmatrix}; \quad K_t^z = \begin{bmatrix} K_t^x & K_t^{xy} \\ K_t^{xy} & K_t^y \end{bmatrix}.$$

Они определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_t &= A^z Z_t + A_0^z + B_0^z V, & V &= \dot{W}; \\ \dot{m}_t^z &= A^z m_t^z + A_0^z, & m_{t_0}^Z &= m_0^z; \\ \dot{K}_t^z &= B^z K_t^z + K_t^z (B^z)^T + B_0^z \nu^m (B_0^z)^T, & K_{t_0}^z &= K_0^z. \end{aligned}$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$A_0^z = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}; \quad A^z = \begin{bmatrix} a_1 & a \\ b_1 & b \end{bmatrix}; \quad B_0^z = \begin{bmatrix} \bar{\psi} \\ \bar{\psi}_1 \end{bmatrix};$$

$$a = k_y^\varphi; \quad a_1 = k_x^\varphi; \quad a_0 = \varphi_0 - k_x^\varphi m_t^x - k_y^\varphi m_t^y;$$

$$b = k_y^{\varphi_1}; \quad b_1 = k_x^{\varphi_1}; \quad b_0 = \varphi_0 - k_x^{\varphi_1} m_t^x - k_y^{\varphi_1} m_t^y;$$

$$\psi dW_0 + \int_{R_0^q} \psi'' P^0(dt, dv) = \bar{\psi} dW; \quad \psi'_1 dW_0 + \int_{R_0^q} \psi''_1 P^0(dt, dv) = \bar{\psi}_1 dW, \quad (32)$$

где ν^W — интенсивность СтП с независимыми приращениями, состоящего из винеровской и пуассоновской частей (32). Тогда уравнения квазилинейного НСОФ будут иметь вид:

$$\dot{\hat{X}}_t = aY_t + a_1\hat{X}_t + a_0 + \beta_t \left[Z_t - \left(bY_t + b_1\hat{X}_t + b_0 \right) \right], \quad (33)$$

$$\beta_t = \left(R_t b_1^T + \bar{\psi} \nu^W \bar{\psi}_1^T \right) \left(\bar{\psi}_1 \nu^W \bar{\psi}_1^T \right)^{-1}; \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_t = a_1 R_t + R_t a_1^T + \bar{\psi} \nu^W \bar{\psi}^T - \\ - \left(R_t b_1^T + \bar{\psi} \nu^W \bar{\psi}_1^T \right) \left(\bar{\psi}_1 \nu^W \bar{\psi}_1^T \right)^{-1} \left(b_1 R_t + \bar{\psi}_1 \nu^W \bar{\psi}^T \right). \end{aligned} \quad (35)$$

Таким образом, приходим к следующим алгоритмам.

1. Дифференциальный НСОФ для (9) и (10) описывается уравнениями (11), (12) и (18) при условии ограниченности функций (13)–(17).
2. Модифицированный НСОФ для (9) и (10) описывается уравнениями (19)–(23) и (30) при условии ограниченности функций (24)–(29).
3. Пусть МСтС (7) и (8) содержит только аддитивные винеровские и пуассоновские шумы и допускает замену статистически линеаризованной, а матрица $\sigma_1 = \bar{\psi}_1 \nu^W \bar{\psi}_1^T$ не вырождена. Тогда в основе алгоритма квазилинейного НСОФ лежат уравнения (33)–(35) при начальных условиях (18).

Применяя методы теории чувствительности [12, 13] для приближенного анализа фильтрационных уравнений и учитывая случайность параметров Θ , приедем к следующим уравнениям для функций чувствительности первого порядка:

$$\begin{aligned} d\nabla^\Theta \hat{X}_s &= \nabla^\Theta A^{\hat{X}_s} dt + \nabla^\Theta B^{\hat{X}_s} dY_t, \quad \nabla^\Theta B^{\hat{X}_s}(t_0) = 0; \\ d\nabla^\Theta R_{sq} &= \nabla^\Theta A^{R_{sq}} dt + \nabla^\Theta B^{R_{sq}} dY_t, \quad \nabla^\Theta R_{sq}(t_0) = 0. \end{aligned}$$

Здесь процедура взятия производных осуществляется по всем входящим переменным, а коэффициенты чувствительности вычисляются при $\Theta = m^\Theta$. При этом предполагается малость дисперсий по сравнению с их математическими ожиданиями. Очевидно, что при дифференцировании по Θ ($\nabla^\Theta = \partial/\partial\Theta$) порядок уравнений возрастает пропорционально числу производных. Аналогично составляются уравнения для элементов матриц вторых функций чувствительности.

4 Алгоритмическое обеспечение синтеза дискретных нормальных субоптимальных фильтров

Рассмотрим гауссовскую нелинейную дискретную СтС следующего вида:

$$X_{k+1} = \varphi_k(X_k) + \psi_k(X_k)V_{1,k}; \quad (36)$$

$$Y_k = \varphi_{1,k}(X_k) + \psi_{1,k}(X_k)V_{2,k}, \quad (37)$$

где $\psi_{1,k}$ не зависит от X_k . Так как нормальное (гауссовское) распределение вектора X_k , аппроксимирующее апостериорное распределение \hat{X}_k , полностью определяется апостериорным математическим ожиданием \hat{X}_k и ковариационной матрицей R_k вектора $\tilde{X}_k = X_k - \hat{X}_k$, то при аппроксимации апостериорного распределения нормальным, применяя уравнения [8, 11], придем к следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1} &= f_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) + \\ &+ h_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \left[Y_{k+1} - f_k^{(1)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \right]; \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} R_{k+1} &= \left\{ f_k^{(2)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) - \right. \\ &- h_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \left(\psi_{1,k} \nu_k \psi_{1,k}^T \right) h \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right)^T \left. \right\} + \\ &+ \sum_{r=1}^{n_y} \rho_r \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \left[Y_{r,k+1} - f_{r,k}^{(1)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \right]. \end{aligned} \quad (39)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$f_k = f_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = M_{\Delta x}^N [\varphi_k]; \quad (40)$$

$$f_k^{(1)} = f_k^{(1)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = M_{\Delta x}^N [\varphi_{1,k}]; \quad (41)$$

$$h_k = h_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = M_{\Delta x}^N \left[X \varphi_{1k}(Y_k, X) + \psi_k \nu_k \psi_{1k}^T(Y_k, X) \right]; \quad (42)$$

$$\begin{aligned} f_k^{(2)} &= f_k^{(2)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = M_{\Delta x}^N \left[\left(X - \hat{X}_{k+1|k} \right) \varphi_k(Y_k, X)^T + \right. \\ &\quad \left. + \varphi_k(Y_k, X) \left(X^T - \hat{X}_{k+1|k} \right) + \psi_k \nu_k \psi_{1,k}^T(Y_k, X) \right]; \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \rho_r \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = & \mathbf{M}_{\Delta x}^N \left[\left(X - \hat{X}_{k+1|k} \right) \left(X^T - \hat{X}_{k+1|k}^T \right) a_r(Y_k, X) + \right. \\ & + \left(X - \hat{X}_{k+1|k} \right) b_r(Y_k, X)^T \left(X^T - \hat{X}_{k+1|k}^T \right) + \\ & \left. + b_r(Y_k, X) \left(X^T - \hat{X}_{k+1|k}^T \right) \right], \quad (44) \end{aligned}$$

где a_r — r -й элемент матрицы-строки $(\varphi_{1k}^T - \varphi_{1k}^T)(\psi_{1k}\nu_k\psi_{1k}^T)^{-1}$, а $b_r = [b_{1r} \cdots b_{nr}]^T$, b_{lr} — элемент l -й строки и r -го столбца матрицы $\psi_k\nu_k\psi_{1,k}^T(\psi_{1k}\nu_k\psi_{1,k}^T)^{-1}$.

В качестве начальных условий принимаются:

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_{1|1} &= \hat{X}_1 = \mathbf{M}_{\Delta x}^N [X_1 | Y_1]; \\ R_{1|1} &= R_1 = \mathbf{M}_{\Delta x}^N \left[(X_1 - X_1^0) (X_1 - X_1^0)^T \right] | Y_1 \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

определеняющие начальное нормальное распределение $\mathcal{N}(\hat{X}_1, R_1)$.

Замечание 3. Число фильтрационных уравнений согласно МНА одномерного распределения $Q_{\text{МНА}} = n_x(n_x + 3)/2$.

При использовании ММНА получаем следующую систему фильтрационных уравнений:

$$m_{k+1} = \mu_k f_{1k} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) + \mu_k h_1 \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right); \quad (46)$$

$$\Gamma_{k+1} = \mu_k f_2 \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k \right) + \mu_k \sum_{r=1}^{n_y} h_{2r} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) Y_{r,k+1}; \quad (47)$$

$$\mu_{k+1} = \mu_{k+1} + \mu_k h_3 \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) (Y_{k+1} - Y_k), \quad (48)$$

где

$$f_{1k} = f_{1k} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = \mathbf{M}_{\Delta x}^N [\varphi_k, Y_k, X]; \quad (49)$$

$$h_{1k} = h_{1k} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = \mathbf{M}_{\Delta x}^N [\sigma_{1k} + X\varphi_{1k}(Y_k, X)]; \quad (50)$$

$$\begin{aligned} f_{2k} = f_{2k} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = & \\ = & \mathbf{M}_{\Delta x}^N \left[\left(X\varphi_k^T + \varphi_k X^T + \sigma_{0k} \right) \sigma_{2k}^{-1}(Y_k, X) \right]; \quad (51) \end{aligned}$$

$$h_{2r} = h_{2r} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = \mathbf{M}_{\Delta x}^N \left[\left(XX^T + Xb_r^T + b_r X^T \right) (Y_k, X) \right]; \quad (52)$$

$$h_3 = h_3 \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = \mathbf{M}_{\Delta x}^N [\varphi_{1k}\sigma_{2k}^{-1}(Y_k, X)]; \quad (53)$$

$$\sigma_{0k} = \psi_k\nu_k\psi_k^T; \quad \sigma_{1k} = \psi_k\nu_k\psi_{1k}^T; \quad \sigma_{2k} = \psi_{1k}\nu_k\psi_{1k}^T. \quad (54)$$

В качестве начальных условий следует принять

$$m_1 = m_{1|1} = \hat{X}_{1|1}; \quad \Gamma_1 = \Gamma_{1|1} = R_{1|1} + \hat{X}_{1|1}\hat{X}_{1|1}^T; \quad \mu_1 = 1, \quad (55)$$

определяющие начальное нормальное распределение.

Замечание 4. Число фильтрационных уравнений ММНА $Q_{\text{ММНА}} = 1 + Q_{\text{МНА}}$.

Для нелинейной гауссовской дискретной СтС вида

$$X_{k+1} = \varphi_k(X_k) + \psi_k V_{1k}^d; \quad (56)$$

$$Y_k = \varphi_{1k}(X_k) + V_{2k}^d \quad (57)$$

при начальных условиях (45) после статистической линеаризации нелинейных функций имеем:

$$\varphi_k \approx \varphi_{0,k} + \varphi_{1,k} X_k^0; \quad \varphi_{1k} \approx \varphi_{10,k} + \varphi_{11,k} X_k^0.$$

Используя уравнения дискретного фильтра Калмана [11] при $a_{0k} = \varphi_{0,k}$, $b_{0k} = \varphi_{10,k}$, $a_{1,k} = \varphi_{1,k}$ и $b_{1,k} = \varphi_{11,k}$, получаем искомые уравнения квазилинейного фильтра:

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + \beta_{k+1} \left(Y_{k+1} - \varphi_{11,k} \hat{X}_{k+1|k} \right); \quad (58)$$

$$\hat{X}_{k+1|k} = \varphi_{1,k} \hat{X}_k + \varphi_{0,k}; \quad (59)$$

$$R_{k+1|k} = \varphi_{1,k} R_k \varphi_{1,k}^T + \psi_k \nu_{1k} \psi_k^T; \quad (60)$$

$$\beta_{k+1} = R_{k+1|k} \varphi_{11,k+1}^T \left(\varphi_{11,k+1} R_{k+1|k} \varphi_{11,k+1}^T + \nu_{2,k+1} \right)^{-1}; \quad (61)$$

$$\begin{aligned} R_{k+1} &= R_{k+1|k} - \beta_{k+1} \varphi_{11,k+1} R_{k+1|k} = \\ &= R_{k+1|k} - R_{k+1|k} \varphi_{11,k+1}^T \left(\varphi_{11,k+1} R_{k+1|k} \varphi_{11,k+1}^T + \nu_{2,k+1} \right)^{-1} \varphi_{11,k+1} R_{k+1|k}. \end{aligned} \quad (62)$$

Таким образом, при непременном условии невырожденности матрицы интенсивностей в уравнении наблюдения ($\det \nu_{2,k} \neq 0$) имеем следующие дискретные алгоритмы нормальной субоптимальной фильтрации.

1. Дискретный НСОФ для системы (36), (37) описывается уравнениями (38), (39) и начальными условиями (45). При этом требуется конечность функций (40)–(44).
2. Дискретный модифицированный НСОФ определяется уравнениями (46)–(48) и (55) при условии конечности функций (49)–(54).
3. Дискретный квазилинейный НСОФ для системы (56), (57) описывается (58)–(62). При этом требуется возможность статистической линеаризации нелинейных функций.

5 Программное обеспечение

В модуле Sts-CFRN.Filter, входящем в библиотеку Sts-Filter, реализованы алгоритмы разд. 3 и 4 на основе степенных разложений. Библиотека Sts-Filter разработана на базе системы MATLAB, но некоторые модули написаны на языке C#. Для символьных преобразований в Sts-Filter реализованы как собственные функции на основе методического обеспечения [8, 9, 11], так и функции ядра системы компьютерной алгебры Maple, входящего в состав MATLAB.

Символьные алгоритмы являются актуальным и интенсивно развивающимся научным направлением [14, 15]. Часто встречающимися синонимами термина «символьные алгоритмы» являются: «компьютерная алгебра», «символьные вычисления», «символьные методы», «аналитические вычисления», «формальные вычисления». Программные системы компьютерной алгебры (СКА) или Computer Algebra System (CAS) является главным прикладным результатом работ в рассматриваемой области. Системы компьютерной алгебры работают с базовыми типами в виде математических объектов: чисел, функций, уравнений, производных, интегралов, векторов, матриц и т. п. В работе СКА можно выделить следующие типовые шаги:

- математические объекты и настроечные параметры задаются на входном языке системы в виде символьных выражений;
- СКА анализирует и переводит символьные выражения во внутреннее представление;
- символьное ядро системы выполняет требуемые преобразования или вычисления и выдает ответ в математической нотации, при этом алгоритмы внутренних преобразований имеют алгебраическую природу.

На рисунке представлены основные этапы работы библиотеки Sts-Filter, при создании которой был использован ранний опыт [16, 17].

В блоке А осуществляется ввод исходных данных: уравнений системы и наблюдений в символьном виде.

Выбор метода решения (используемого модуля библиотеки) осуществляется оператором в блоке В.

Блок преобразования данных (С) использует символьные алгоритмы для упрощения выражений и приведения их к стандартному виду. Для полиномов задействованы следующие функции:

- умножение полиномов;
- приведение полиномов к каноническому виду;
- получение всех термов полинома и коэффициентов в символьном виде.

В блоке Д реализованы основные алгоритмы получения систем дифференциальных уравнений (СДУ) для моментов СтС и уравнений фильтрации.

Для СтС с полиномиальными нелинейностями используются функции аналитического вывода уравнений в соответствии со следующими выражениями:



Структура пакета прикладных программ

$$\varphi(Y) = Y_1^{\nu_1} \dots Y_n^{\nu_n};$$

$$\varphi_0(m, K) = \alpha_\nu = m_p \alpha_{\nu-e_p} + \sum_{\nu=1}^n \nu_r k_{pr} \alpha_{\nu-e_p-e_r} - k_{pp} \alpha_{\nu-2e_p},$$

где $\alpha_0 = 1$, $\alpha_{e_p} = m_p$, $\nu = [\nu_1 \dots \nu_n]^T$, $|\nu| = \nu_1 + \dots + \nu_n$, $e_p = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T$,
 $k = [k_{p1} \dots k_{pn}]$ ($p = 1, \dots, n$), $K = [k_{pq}]$ ($p, q = 1, \dots, n$).

Для вычисления интегралов вида

$$M_N(\cdot) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} (\cdot) \exp \left[-\frac{(\eta - m_y)^2}{2D_y} \right] dy$$

используется функция «int» символьного ядра Maple, которая позволяет получать коэффициенты при численном решении фильтрационных СДУ. Для получения в символьном виде степенных разложений функций используется метод «series» символьного ядра Maple. В блоке моделирования (E) используются

функции MATLAB для численного решения СДУ. Существенным преимуществом MATLAB является наличие мощных средств вывода итоговой информации в графическом виде.

6 Заключение

Разработано инструментальное алгоритмическое и программное обеспечение модуля StS-CFRN.Filter, входящего в библиотеку StS-Filter. Модуль основан на степенных разложениях. Он позволяет синтезировать непрерывные (дифференциальные) и дискретные НСОФ для практически важного класса нелинейных СтС, когда, во-первых, уравнения наблюдения не содержат пуассоновского шума, а во-вторых, коэффициент при винеровском шуме не зависит от состояния. Подробно рассмотрено программное обеспечение для символьных и несимвольных алгоритмов. В приложении приведены тестовые примеры, иллюстрирующие эффективность фильтров для задач оперативной оценки надежности и безопасности технических систем.

Приложения

П.1. Для ДРН

$$\varphi^{\text{ДРН}}(Y_t, t) = (Y_t + b_t)^{-\mu}$$

степенные разложения коэффициентов статистической линеаризации имеют вид (6), причем ρ_{2h} и ρ_{2h+1} определяются формулами:

$$\rho_{2h} = \frac{\mu(\mu+1)\dots(\mu+2h)}{(2h)!b_t^{\mu+2h}}; \quad \rho_{2h+1} = -\frac{\mu(\mu+1)\dots(\mu+2h+1)}{(2h+1)!b_t^{\mu+2h+1}}.$$

Аналогично рассматриваются ДРН вида

$$\varphi(Y_t, t) = (Y_t + b_{1t})^{-\mu_1} (Y_t + b_{2t})^{-\mu_2}; \quad \varphi^{\text{ДРН}}(Y_t, t) = Y_t (Y_t + b_{1t})^{-\mu_1} (Y_t + b_{2t})^{\mu_2}.$$

Такие характеристики встречаются в квантовооптических средствах информатики, использующих лазерные интерферометры.

П.2. Рассмотрим квантовооптическую систему второго порядка с ДРН

$$\dot{X}_{1t} = X_{2t}; \quad \dot{X}_{2t} = -\omega_0^2 X_{1t} - 2\varepsilon_0 X_{2t} + \varphi(X_{1t}) + V_1; \quad (63)$$

$$\varphi(X_{1t}) = a_* (b_* + X_{1t})^{-2} \quad (64)$$

при линейном наблюдении X_{1t} :

$$Z_{1t} = X_{1t} + V_2.$$

Здесь ε_0 , ω_0 , a_* и b_* — постоянные параметры; V_1 и V_2 — гауссовские независимые белые шумы с постоянными интенсивностями ν_1 и ν_2 .

Проведем статистическую линеаризацию нелинейной функции (64). Опуская верхний индекс x , получим:

$$\varphi(X_{1t}) = \varphi_0(m_1, D_1) + k_1(m_1, D_1) X_{1t}^0.$$

Здесь φ_0 и k_1 — коэффициенты статистической линеаризации:

$$\varphi_0 = \varphi_0(m_1, D_1) = a_* b_*^{-2} [1 + \chi(m_1, D_1)]; \quad (65)$$

$$k_1 = k_1(m_1, D_1) = \frac{\partial \varphi_0}{\partial m_1} = a_* b_*^{-2} \frac{\partial \chi}{\partial m_1}(m_1, D_1); \quad (66)$$

$$\chi(m_1, D_1) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{E(n/2)} (-1)^n (n+1) n! b_*^{-n} m_1^n \frac{1}{(n-2k)! k!} \left(\frac{D_1}{2m_1^2}\right)^k,$$

где $E(n/2)$ — целая часть $n/2$. Уравнениям (63) и (64) отвечает следующая статистически линеаризованная модель:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{1t} &= m_{2t}; & \dot{m}_{2t} &= -\omega_0^2 m_{1t} - 2\varepsilon_0 m_{2t} + \varphi_0(m_{1t}, D_{1t}); \\ \dot{X}_{1t}^0 &= X_{2t}^0; & \dot{X}_{2t}^0 &= -2\varepsilon_0 X_{2t}^0 - \omega_0^{3/2} X_{1t}^0 + V_1, \end{aligned} \quad (67)$$

где через $\omega_0^{3/2}$ обозначена эффективная частота, определяемая формулой

$$\omega_0^{3/2} = \omega_0^2 [1 - \omega_0^{-2} k_1(m_{1t}, D_{1t})]. \quad (68)$$

Полагая

$$\begin{aligned} \varphi_{00} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_0(m_{1t}, D_{1t}) \end{bmatrix}; & \varphi_{01} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^{3/2} & -2\varepsilon_0 \end{bmatrix}; & b_1 &= [1 \ 0]; & b_0 &= 0; \\ R_t &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12} & R_{22} \end{bmatrix}; & \beta_t &= R_t b_1^T \nu_2^{-1} = \nu_2^{-1} \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{12} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

m_{1t} , m_{2t} удовлетворяют уравнениям (67), а $K_{11} = D_{1t}$, $K_{22} = D_{2t}$, $K_{12} = K_{21}$, $\dot{D}_1 = 2K_{12}$, $\dot{K}_{12} = D_2 - \omega_0^{3/2} D_1 - 2\varepsilon_0 K_{12}$, $\dot{D}_2 = \nu_1 - 2\omega_0^{3/2} K_{12} - 4\varepsilon_0 D_2$, придем к следующим окончательным уравнениям квазилинейного фильтра:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{X}}_{1t} &= \hat{X}_{2t} + R_{11} \nu_2^{-1} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t}); \\ \dot{\hat{X}}_{2t} &= \varphi_0 - k_1 m_{1t}^x - \omega_0^{3/2} \hat{X}_{1t} - 2\varepsilon_0 \hat{X}_{2t} + R_{12} \nu_2^{-1} (Z_{1t} - \hat{X}_{1t}); \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{R}_{11} &= 2R_{12} - \nu_2^{-1} R_{11}^2; & \dot{R}_{12} &= R_{22} - \omega_0^{3/2} R_{11} - 2\varepsilon_0 R_{12} - \nu_2^{-1} R_{11} R_{12}; \\ \dot{R}_{22} &= \nu_1 - 2\omega_0^{3/2} R_{12} - 4\varepsilon_0 R_{22} - \nu_2^{-1} R_{12}^2, \end{aligned} \right\} \quad (70)$$

где φ_0 , k_1 и $\omega_0^{3/2}$ определяются по формулам (65), (66) и (68).

П.3. В случае, когда наблюдается переменная X_{2t} : $Z_{2t} = X_{2t} + V_3$, фильтрационные уравнения имеют вид (69) и (70), если заменить в них последние члены, содержащие ν_2^{-1} , на $R_{12} \nu_3^{-1} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t})$, $R_{22} \nu_3^{-1} (Z_{2t} - \hat{X}_{2t})$ и $-\nu_3^{-1} R_{12}^2$, $-\nu_3^{-1} R_{12} R_{22}$, $-\nu_2^{-1} R_{22}^2$ соответственно.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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. 3–19.
5. 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.
6. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными дробно-рациональными нелинейностями // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 4. С. 3–17.
7. 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 дробно-рациональными нелинейностями // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 1. С. 227–247.
8. Синицын И. Н. Нормальные и ортогональные субоптимальные фильтры для нелинейных стохастических систем на многообразиях // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 1. С. 199–226.
9. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
10. Синицын И. Н., Синицын В. И. Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации распределений в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
11. Синицын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачёва. — 2-е изд. — М.: Логос, 2007. 776 с.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике / Пер. с англ. — М.: Наука, 1984. (Korn G. A., Korn T. M. Mathematical handbook. — New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1968. 943 p.)
13. Попов Б. А., Теслер Г. С. Вычисление функций на ЭВМ. — Киев: Наукова Думка, 1984. 599 с.
14. Компьютерная алгебра: Символьные и алгебраические вычисления / Пер. с англ.; Под ред. Б. Бухбергера, Дж. Коллинза, Р. Лооса. — М.: Мир, 1986. 392 с. (Computer algebra: Symbolic and algebraic computation / Eds. B. Buchberger, G. E. Collins, R. Loos, R. Albrecht. — 2nd ed. — Wien – New York: Springer-Verlag, 1983. 410 p.)

15. Дьяконов В. П. Энциклопедия компьютерной алгебры. — М.: ДМК Пресс, 2009. 1264 с.
16. Синицын И. Н., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Куценко А. В. Развитие методического и программного обеспечения на основе символьных вычислений для исследования стохастических систем // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'07): Тр. VI Междунар. конф., 2007. CD-ROM. С. 1447–1462.
17. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Агафонов Е. С. Символьное математическое обеспечение для анализа и моделирования стохастических систем, основанное на канонических разложениях случайных функций // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'09): Тр. VIII Междунар. конф., 2009. CD-ROM. С. 1059–1072.

Поступила в редакцию 07.07.16

MATHEMATICAL SOFTWARE FOR SUBOPTIMAL NORMAL FILTERING IN STOCHASTIC SYSTEMS WITH COMPLEX FRACTION-RATIONAL NONLINEARITIES

*I. N. Sinitsyn, V. I. Sinitsyn, I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, V. V. Belousov,
V. S. Shorgin, and E. S. Agafonov*

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

Abstract: The paper describes the instrumental algorithms and software tools for the module “StS-CFRN.Filter” in numerical library “StS-Filter.” The module is based on series approximations. It gives the opportunity to synthesize differential and difference normal suboptimal filters for specific nonlinear stochastic systems. Such StS have the following peculiarities: observation equations do not include Poisson noise and coefficient at Wiener noise does not depend on state variables. Special attention is paid to the software tools based on symbolic and nonsymbolic algorithms. The practical efficiency of the software tools has been illustrated.

Keywords: complex fraction-rational nonlinearities (CFRN); module “StS-CFRN.Filter;” normal approximation method (NAM); numerical library “StS-Filter;” stochastic linearization method (SLM); stochastic systems (StS)

DOI: 10.14357/08696527160301

Acknowledgments

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

References

1. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2014. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi nelineynostyami [Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with complex nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(3):2–4.
2. 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.
3. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, and E. R. Korepanov. 2015. Modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi irratsional'nyimi nelineynostyami [Modeling of normal processes in stochastic systems with complex irrational nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(1):2–8.
4. 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'nyimi 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):3–19.
5. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, and E. R. Korepanov. 2015. Modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi transsidentnymi nelineynostyami [Modeling of normal processes in stochastic systems with complex transcendental nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(2):23–29.
6. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, and E. R. Korepanov. 2015. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi drobno-ratsional'nyimi nelineynostyami [Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with complex fractional-rational nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(4):3–17.
7. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and V. S. Shorgin. 2016. Matematicheskoe obespechenie modelirovaniya normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi drobno-ratsional'nyimi nelineynostyami [Software tools for analytical modeling of normal processes in stochastic systems with fraction-rational nonlinearities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(1):227–247.
8. Sinitsyn, I. N., 2016. Normal'nye i ortogonal'nye suboptimal'nye fil'try dlya nelineynykh stokhasticheskikh sistem na mnogoobraziyakh [Normal orthogonal suboptimal filters for nonlinear stochastic systems on manifolds]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(1):199–226.
9. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
10. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2013. Lektsii po normal'noy i ellipsoidal'noy approksimatsii raspredeleniy v stokhasticheskikh sistemakh [Lectures on normal and ellipsoidal approximation in stochastic systems]. Moscow: TORUS PRESS. 488 p.
11. Sinitsyn, I. N. 2007. *Fil'try Kalmana i Pugacheva* [Kalman and Pugachev Filters]. 2nd ed. Moscow: Logos. 776 p.

12. Korn, G. A., and T. M. Korn. 1968. *Mathematical handbook*. New York, NY: McGraw-Hill. 943 p.
13. Popov, B. A., and G. S. Tesler. 1984. *Vychislenie funktsiy na EVM: Spravochnik* [Calculation of functions on the computer: Handbook]. Kiev: Naukova Dumka. 599 p.
14. Buchberger, B., G. E. Collins, R. Loos, and R. Albrecht, eds. 1983. *Computer algebra: Symbolic and algebraic computation*. 2nd ed. Wien–New York: Springer-Verlag. 410 p.
15. D'yakonov, V. P. 2009. *Entsiklopediya komp'yuternoy algebry* [Computer algebra encyclopedia]. Moscow: DMK Press. 1264 p.
16. Sinitsyn, I. N., E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and A. V. Kutsenko. 2007. Razvitiye metodicheskogo i programmnogo obespecheniya na osnove simvol'nykh vychisleniy dlya issledovaniya stokhasticheskikh sistem [Development of methodological and program software tools on symbolic computing for stochastic systems research]. *6th Conference (International) on System Identification and Control Problems Proceedings*. CD-ROM. 1447–1462.
17. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and E. S. Agafonov. 2009. Simvol'noe matematicheskoe obespechenie dlya analiza i modelirovaniya stokhasticheskikh sistem, osnovannoe na kanonicheskikh razlozheniyakh sluchaynykh funktsiy [Symbolic mathematical software for analysis and modeling of stochastic systems based on canonical representation of random functions]. *8th Conference (International) on System Identification and Control Problems Proceedings*. CD-ROM. 1059–1072.

Received July 07, 2016

Contributors

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

Sinitsyn Vladimir I. (b. 1968) — Doctor of Science in physics and mathematics, associate professor, 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; VSinitsyn@ipiran.ru

Sergeev Igor V. (b. 1965) — Candidate of Science (PhD) in technology, Deputy Director, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; ISergeev@ipiran.ru

Korepanov Eduard R. (b. 1966) — 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; Ekorepanov@ipiran.ru

Belousov Vasiliy V. (b. 1977) — 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; VBelousov@ipiran.ru

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

Agafonov Egor S. (b. 1981) — 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; EAgafonov@ipiran.ru

СИМВОЛЬНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СО СЛОЖНЫМИ БЕССЕЛЕВЫМИ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ ДРОБНОГО ПОРЯДКА*

И. Н. Синицын¹, Э. Р. Корепанов², В. В. Белоусов³

Аннотация: Рассматриваются методы аналитического моделирования (МАМ) нормальных (гауссовых) процессов в гауссовых и негауссовых стохастических системах (СтС) со сложными бесселевыми нелинейностями дробного порядка (БНДП). Примерами БНДП могут служить сферические, модифицированные сферические и нелинейности, описываемые функциями Эйри. На основе эрмитовских многочленных представлений разработаны алгоритмы вычисления коэффициентов статистической линеаризации. Особое внимание уделено символьным МАМ. В качестве тестового примера рассмотрена задача аналитического моделирования помехоустойчивости осциллятора Бесселя дробного порядка (ОБДП).

Ключевые слова: бесселева нелинейность дробного порядка (БНДП); метод аналитического моделирования (МАМ); метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); модифицированные сферические бесселевы нелинейности; нелинейности Эйри; нормальный (гауссовский) стохастический процесс; символьное аналитическое моделирование; сферические бесселевы нелинейности

DOI: 10.14357/08696527160302

1 Введение

Методы аналитического моделирования процессов в динамических системах со сложными цилиндрическими бесселевыми нелинейностями (БН) целого порядка при гармонических и стохастических, узкополосных и широкополосных возмущениях впервые рассмотрены в [1]. Даны необходимые сведения из теории бесселевых функций и сложных БН (СБН). Приведено методическое и алгоритмическое обеспечение МАМ на основе методов статистической

* Работа выполнена при поддержке ОНИТ РАН (проект 0063-2015-0017 III.3).

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

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

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

линеаризации (МСЛ) и нормальной аппроксимации (МНА) для стохастических широкополосных процессов типа белого шума. Рассмотрены особенности МАМ для гармонических и узкополосных стохастических процессов. В приложении приведены формулы для коэффициентов МСЛ для типовых бесселевых нелинейностей целого порядка. В качестве тестовых примеров рассмотрены задачи МАМ процессов в одномерных системах с аддитивными и мультиплексивными белыми шумами. Особое внимание уделено процессам в бесселевом осцилляторе в условиях различных возмущений. В [2] рассмотрены особенности МАМ нормальных процессов на основе МНА (МСЛ) в гауссовых и негауссовых стохастических системах со сложными БНДП. Даны необходимые сведения из теории действительных бесселевых функций и сложных БНДП. Представлены степенные алгоритмы вычисления коэффициентов МНА (МСЛ), а также алгоритмы МАМ нормальных процессов в СтС с БНДП и тестовые примеры.

Рассмотрим развитие [2] на случай, когда для БНДП $f_n: j_n, i_n, \tilde{i}_n, A_i, B_i$ используются эрмитовские многочленные представления. Особое внимание уделим символьным алгоритмам МАМ. В качестве тестового примера рассмотрим задачу аналитического моделирования помехоустойчивости ОБДП в стохастической среде.

2 Нелинейности Бесселя дробного порядка и их статистическая линеаризация

Наиболее распространенными функциями Бесселя (Φ_B) дробного порядка являются сферические и модифицированные сферические Φ_B , а также функции Эйри [3–5].

Сферические Φ_B первого и второго рода являются действительными функциями и определяются следующими формулами:

$$j_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} J_{n+1/2}(z); \quad y_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} Y_{n+1/2}(z).$$

Здесь введены следующие обозначения [2, приложение 1]: $J_\nu(z)$ — Φ_B первого рода; $Y_\nu(z)$ — Φ_B второго рода (называемые также функциями Вебера или Неймана, причем $Y_\nu(z) \equiv N_\nu(z)$).

Модифицированные сферические Φ_B первого и второго рода выражаются следующими формулами:

$$i_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} I_{n+1/2}(z); \quad \tilde{i}_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} I_{-n-1/2}(z).$$

Здесь $I_n(z)$ — модифицированная цилиндрическая Φ_B [2, приложение 1].

Функции Эйри $\text{Ai}(z)$ и $\text{Bi}(z)$ определяются следующими формулами:

$$\text{Ai}(z) = c_1 f(z) - c_2 g(z); \quad \text{Bi}(z) = \sqrt{3} [c_1 f(z) + c_2 g(z)].$$

Здесь

$$f(z) = \sum_{l=0}^{\infty} 3^l \left(\frac{1}{3}\right)_l \frac{z^{3l}}{(3l)!}; \quad g(z) = \sum_{l=0}^{\infty} 3^l \left(\frac{2}{3}\right)_l \frac{z^{3l+1}}{(3l+1)!},$$

где

$$c_1 = \text{Ai}(0) = \frac{\text{Bi}(0)}{3} = \frac{3^{-2/3}}{\Gamma(2/3)} \approx 0,35502;$$

$$c_2 = -\text{Ai}'(0) = \frac{\text{Bi}'(0)}{\sqrt{3}} = \frac{3^{-1/3}}{\Gamma(1/3)} \approx 0,25881;$$

$$\left(a + \frac{1}{3}\right)_0 = 1; \quad 3^l \left(a + \frac{1}{3}\right)_l = (3a+1)(3a+4) \cdots (3a+3l-2).$$

В [2, приложение 2] приведены необходимые свойства и степенные представления ФБ дробного порядка.

Теперь рассмотрим скалярное безынерционное нелинейное детерминированное преобразование вида

$$Z = \varphi(Y, t). \quad (1)$$

Здесь под φ понимается ФБ. Нелинейности, описываемые (1), следуя [1], будем называть бесселевыми нелинейностями.

Примерами СБН [1, 2] могут служить представления посредством сумм типовых БН, дробно-рациональные представления, а также нелинейности, получаемые путем соответствующего преобразования аргумента. В качестве примеров скалярных СБН векторного аргумента могут служить представления для соответствующих компонент векторов. В случае векторных и матричных СБН приведенные в [1, 2] формулы имеют место для соответствующих компонент.

Применим статистическую линеаризацию по Казакову [6–8] БН (1) (индекс «СБН» для краткости опускается) при несимметричном ($m_y \neq 0$) гауссовском стохастическом входном сигнале Y_t :

$$Y_t = Y(t) = m_y + Y_t^0,$$

где m_y — математическое ожидание, а D_y — дисперсия, $Y_t^0 = Y^0(t) = Y(t) - m_y$. В соответствии с МСЛ зависимость аппроксимируется следующим выражением:

$$Z_t = \varphi_0(m_y, D_y, t) + k_1(m_y, D_y, t) Y_t^0. \quad (2)$$

Здесь φ_0 и k_1 — коэффициенты статистической линеаризации, зависящие от m_y и D_y и определяемые по формулам:

$$\begin{aligned}\varphi_0 &= \varphi_0(m_y, D_y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\eta, t) e^{-(\eta-m_y)^2/(2D_y)} d\eta; \\ k_1 &= k_1(m_y, D_y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} (\eta - m_y) \varphi(\eta, t) e^{-(\eta-m_y)^2/(2D_y)} d\eta = \\ &= \frac{\partial \varphi_0(m_y, D_y)}{\partial m_y}.\end{aligned}$$

Для нечетных функций φ имеем:

$$\begin{aligned}\varphi_0(m_y, D_y, t) &= k_0(m_y, D_y, t) m_y; \\ k_0(m_y, D_y, t) &= \frac{1}{m_y \sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\eta, t) e^{-(\eta-m_y)^2/(2D_y)} d\eta.\end{aligned}\quad (3)$$

3 Коэффициенты статистической линеаризации бесселевых нелинейностей дробного порядка первого и второго рода на основе степенных разложений

В [2] получены выражения для коэффициентов статистической линеаризации сферических БН и нелинейностей Эйри. Ограничиваюсь в формулах [1, 2] отрезками из N членов, придем к следующим алгоритмам:

$$\varphi_0^{j_n}(m_y, D_y, t) = \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{(2k)!!(2k+2n+1)!!} \varphi_0^{z^{2k+n}}(m_y, D_y, t) + R_{0N}^{j_n}; \quad (4)$$

$$\varphi_0^{i_n}(m_y, D_y, t) = \sum_{k=0}^N \frac{1}{(2k)!!(2k+2n+1)!!} \varphi_0^{z^{2k+n}}(m_y, D_y, t) + R_{0N}^{i_n}; \quad (5)$$

$$k_1^{j_n}(m_y, D_y, t) = \begin{cases} \varphi_0^{z^{j_n}}(m_y, D_y, t) - m_y \varphi_0^{j_n}(m_y, D_y, t) + R_{1N}^{j_n} & \text{для } m_y \neq 0; \\ \varphi_0^{z^{j_n}}(0, D_y, t) + R_{1N}^{j_n} & \text{для } m_y = 0; \end{cases} \quad (6)$$

$$k_1^{i_n}(m_y, D_y, t) = \begin{cases} \varphi_0^{z^{i_n}}(m_y, D_y, t) - m_y \varphi_0^{i_n}(m_y, D_y, t) + R_{1N}^{i_n} & \text{для } m_y \neq 0; \\ \varphi_0^{z^{i_n}}(0, D_y, t) + R_{1N}^{i_n} & \text{для } m_y = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь

$$\varphi_0^{z^h}(m_y, D_y, t) = \frac{\exp(-m_y^2/(2D_y))}{\sqrt{2\pi D_y}} \sum_{l=0}^N \frac{[1 + (-1)^{h+l}]}{l!} A^{h+l}(D_y) \left(\frac{m_y}{D_y}\right)^l + R_{0N}^{z^h} \quad (h = 1, 2, \dots); \quad (8)$$

$$A^{2h}(D_y) = \frac{(2h-1)!!}{2} D_y^h \sqrt{2\pi D_y}, \quad A^{2h+1}(D_y) = \frac{h!}{2^h} D_y^{h+1} \quad (h = 1, 2, \dots); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \varphi_0^{y_n}(m_y, D_y, t) &= - \sum_{k=0}^N \frac{(2n-2k-1)!!}{(2k)!!} \varphi_0^{z^{2k+n}}(m_y, D_y, t) - \\ &\quad - \sum_{k=n}^N \frac{(-1)^k}{(2k)!!(2k-2n+1)!!} \varphi_0^{z^{2k+n}}(m_y, D_y, t) + R_{1N}^{y_n}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$k_1^{y_n}(m_y, D_y, t) = \begin{cases} \varphi_0^{z^{y_n}}(m_y, D_y, t) - m_y \varphi_0^{y_n}(m_y, D_y, t) + \\ \quad + R_{1N}^{y_n} = \frac{\partial \varphi_0^{y_n}}{\partial m_y}(m_y, D_y, t) & \text{для } m_y \neq 0; \\ \varphi_0^{z^{y_n}}(0, D_y, t) + R_{1N}^{y_n} & \text{для } m_y = 0; \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \varphi_0^{\tilde{i}_n}(m_y, D_y, t) &= \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(-1)^{n+k}(2n-2k)-1!!}{(2k)!!} \varphi_0^{z^{2k-n-1}}(m_y, D_y, t) + \\ &\quad + \sum_{k=n}^N \frac{(2k+1-2n)!!}{(2k)!!} \varphi_0^{z^{2k-n-1}}(m_y, D_y, t) + R_{0N}^{\tilde{i}_n}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} k_1^{\tilde{i}_n}(m_y, D_y, t) &= \\ &= \begin{cases} \varphi_0^{z^{\tilde{i}_n}}(m_y, D_y, t) - m_y \varphi_0^{\tilde{i}_n} + R_{1N}^{\tilde{i}_n}(m_y, D_y, t) & \text{для } m_y \neq 0; \\ \varphi_0^{z^{\tilde{i}_n}}(0, D_y, t) & \text{для } m_y = 0; \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\varphi_0^{\text{Ai}}(m_y, D_y, t) = c_1 \varphi_0^f(m_y, D_y, t) - c_2 \varphi_0^g(m_y, D_y, t); \quad (14)$$

$$\varphi_0^{\text{Bi}}(m_y, D_y, t) = \sqrt{3} [c_1 \varphi_0^f(m_y, D_y, t) + c_2 \varphi_0^g(m_y, D_y, t)]; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} k_1^{\text{Ai}}(m_y, D_y, t) &= \\ &= \begin{cases} \varphi_0^{z^{\text{Ai}}}(m_y, D_y, t) - m_y \varphi_0^{\text{Ai}}(m_y, D_y, t) = \frac{\partial \varphi_0^{\text{Ai}}}{\partial m_y}(m_y, D_y, t) & \text{для } m_y \neq 0; \\ k_1^{z^{\text{Ai}}}(0, D_y, t) & \text{для } m_y = 0; \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

$$k_1^{\text{Bi}}(m_y, D_y, t) = \begin{cases} \varphi_0^{z\text{Bi}}(m_y, D_y, t) - m_y \varphi_0^{\text{Bi}}(m_y, D_y, t) = \frac{\partial \varphi_0^{\text{Bi}}}{\partial m_y}(m_y, D_y, t) \text{ для } m_y \neq 0; \\ k_1^{z\text{Bi}}(0, D_y, t) \text{ для } m_y = 0, \end{cases} \quad (17)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0^f(m_y, D_y, t) &= \sum_{l=0}^N 3^l \left(\frac{1}{3}\right)_l \frac{\varphi_0^{3l}(m_y, D_y, t)}{(3l)!} + R_{0N}^f; \\ \varphi_0^g(m_y, D_y, t) &= \sum_{l=0}^N 3^l \left(\frac{2}{3}\right)_l \frac{\varphi_0^{3l+1}(m_y, D_y, t)}{(3l+1)!} + R_{0N}^g. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Для оценки остаточных членов $R_{0N}^{f_n}$ и $R_{1N}^{f_n}$ используются известные формулы [6].

Таким образом, имеем следующий результат.

Теорема 1. При $m_y > 0, D_y > 0$ в основе степенных алгоритмов расчета коэффициентов статистической линеаризации БНДП $f_n: j_n, i_n, y_n, \tilde{i}_n, \text{Ai}, \text{Bi}$ лежат формулы (4)–(18).

4 Коэффициенты статистической линеаризации бесселевых нелинейностей дробного порядка первого и второго рода на основе эрмитовой многочленной аппроксимации

В [9] разработан метод квадратурного вычисления коэффициентов статистической линеаризации сложных трансцендентных нелинейностей на основе следующей эрмитовой аппроксимации:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} f(x) dx = \sum_{l=1}^N \alpha_l f(x_l) + R_N^f; \quad (19)$$

Здесь x_l — l -й нуль многочлена Эрмита $H_N(x)$; α_l — весовые коэффициенты, определяемые формулой

$$\alpha_l = \frac{2^{N-1} N! \sqrt{\pi}}{N^2 [H_{N-1}(x_l)]^2}; \quad (20)$$

R_N^f — остаточный член, равный

$$R_N^f = \frac{N! \sqrt{\pi}}{2^N (2N)!} f^{(2N)}(\xi) \quad (-\infty < \xi < \infty). \quad (21)$$

Применяя формулы (19)–(21) к БНДП f_n : j_n , i_n , y_n , \tilde{i}_n , A_i , B_i , придем к следующим результатам:

$$\varphi_0^{f_n}(m_y, D_y, t) = \frac{\exp(-m_y^2/(2D_y))}{\sqrt{2\pi D_y}} \sum_{l=1}^N f_n(x_l) \exp\left(-\frac{m_l}{D_l} x_l\right) + R_{0N}^{f_n}; \quad (22)$$

$$R_{0N}^{f_n} = \frac{N! \sqrt{\pi}}{2^N (2N)!} \left[f_n(\xi) \exp\left(-\frac{m_l}{D_l} \xi\right) \right]^{2N}; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} k_1^{f_n}(m_y, D_y, t) &= \\ &= \begin{cases} \varphi_{0N}^{f_n}(m_y, D_y, t) - m_y \varphi_{0N}^{f_n}(m_y, D_y, t) + R_{1N}^{f_n} & \text{для } m_y \neq 0; \\ \varphi_{0N}^{f_n}(0, D_y, t) + R_{1N}^{f_n} & \text{для } m_y = 0; \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

$$R_{1N}^{f_n}(m_y, D_y, t) = \frac{N! \sqrt{2\pi}}{2^n (2N)!} \left[\xi f_n(\xi) \exp\left(-\frac{m_l}{D_l} \xi\right)^{-2N} \right]. \quad (25)$$

Таким образом, имеем следующий результат.

Теорема 2. При $m_y > 0$, $D_y > 0$ в основе эрмитовского алгоритма расчета коэффициентов статистической линеаризации БНДП f_n : j_n , i_n , y_n , \tilde{i}_n , A_i , B_i лежат формулы (22) и (24). При этом точность алгоритмов оценивается согласно (23) и (25).

5 Аналитическое моделирование нормальных процессов в непрерывных и дискретных стохастических системах

Уравнения конечномерных непрерывных нелинейных систем со стохастическими возмущениями путем расширения вектора состояния СтС могут быть записаны в виде следующего векторного стохастического дифференциального уравнения Ито [1, 6, 7]:

$$dY_t = a(Y_t, t) dt + b(Y_t, t) dW_0 + \int_{R_0} c(Y_t, t, v) P^0(dt, dv), \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (26)$$

Здесь Y_t — $(p \times 1)$ -мерный вектор состояния, $Y_t \in \Delta_y$ (Δ_y — многообразие состояний); $a = a(Y_t, t)$ и $b = b(Y_t, t)$ — известные $(p \times 1)$ -мерная и $(p \times m)$ -мерная функции Y_t и t ; $W_0 = W_0(t)$ — $(r \times 1)$ -мерный винеровский стохастический процесс (СтП) интенсивности $\nu_0 = \nu_0(t)$; $c(Y_t, t, v)$ — $(p \times 1)$ -мерная функция Y_t ,

t и вспомогательного $(q \times 1)$ -мерного параметра v ; $\int_{\Delta} dP^0(t, A)$ — центрированная пуассоновская мера, определяемая

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

При этом принято: \int_{Δ} — число скачков пуассоновского СтП в интервале времени $\Delta = (t_1, t_2]$; $\nu_P(t, A)$ — интенсивность пуассоновского СтП $P(t, A)$; A — некоторое борелевское множество пространства R_0^q с выколотым началом. Начальное значение Y_0 представляет собой случайную величину, не зависящую от приращений $W_0(t)$ и $P(t, A)$ на интервалах времени, следующих за t_0 , $t_0 \leq t_1 \leq t_2$, для любого множества A . Элементы векторно-матричных функций $a(Y_t, t)$, $b(Y_t, t)$ и $c(Y_t, t, v)$ являются СБН дробного порядка.

В случае аддитивных гауссовских (нормальных) и обобщенных пуассоновских возмущений уравнение (26) принимает вид [1, 5, 7]

$$\dot{Y} = a(Y_t, t) + b_0(t)V, \quad V = \dot{W}, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (27)$$

Здесь W — СтП с независимыми приращениями, представляющий собой смесь нормального и обобщенного пуассоновского СтП.

Если существуют конечные вероятностные моменты второго порядка для моментов времени t_1 и t_2 , то уравнения МНА примут следующий вид [1, 6, 7]:

– для характеристических функций:

$$\left. \begin{aligned} g_1^N(\lambda; t) &= \exp \left[i\lambda^T m_t - \frac{1}{2} \lambda^T K_t \lambda \right] ; \\ g_{t_1, t_2}^N(\lambda_1, \lambda_2; t_1, t_2) &= \exp \left[i\bar{\lambda}^T \bar{m}_2 - \frac{1}{2} \bar{\lambda}^T \bar{K}_2 \bar{\lambda} \right] , \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где

$$\bar{\lambda} = [\lambda_1^T \lambda_2^T]^T; \quad \bar{m}_2 = [m_{t_1}^T m_{t_2}^T]^T; \quad \bar{K}_2 = \begin{bmatrix} K(t_1, t_1) & K(t_1, t_2) \\ K(t_2, t_1) & K(t_2, t_2) \end{bmatrix};$$

– для математических ожиданий m_t , ковариационной матрицы K_t и матрицы ковариационных функций $K(t_1, t_2)$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t &= a_1(m_t, K_t, t), & m_0 &= m(t_0); \\ \dot{K}_t &= a_2(m_t, K_t, t), & K_0 &= K(t_0); \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K(t_1, t_2) a_{21}(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T, & K(t_1, t_1) &= K_{t_1}. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 m_t &= \mathbf{M}_{\Delta_y}^N [Y_t], \quad Y_t^0 = Y_t - m_t; \\
 K_t &= \mathbf{M}_{\Delta_y}^N \left[Y_t^0 Y_t^{0T} \right], \quad K(t_1, t_2) = \mathbf{M}_{\Delta_y}^N \left[Y_{t_1}^0 Y_{t_2}^{0T} \right]; \\
 a_1 &= a_1(m_t, K_t, t) = \mathbf{M}_{\Delta_y}^N [a(Y_t, t)]; \\
 a_2 &= a_2(m_t, K_t, t) = a_{21}(m_t, K_t, t) + a_{21}(m_t, K_t, t)^T + a_{22}(m_t, K_t, t); \\
 a_{21} &= a_{21}(m_t, K_t, t) = \mathbf{M}_{\Delta_y}^N \left[a(Y_t, t) Y_t^{0T} \right]; \\
 a_{22} &= a_{22}(m_t, K_t, t) = \mathbf{M}_{\Delta_y}^N [\bar{\sigma}(Y_t, t)]; \\
 \sigma(Y_t, t) &= b(Y_t, t) \nu_0(t) b(Y_t, t)^T; \\
 \bar{\sigma}(Y_t, t) &= \sigma(Y_t, t) + \int_{R_0^q} c(Y_t, t, v) c(Y_t, t, v)^T \nu_P(t, dv),
 \end{aligned} \tag{30}$$

где $\mathbf{M}_{\Delta_y}^N$ — символ вычисления математического ожидания для нормальных распределений (28) на гладком многообразии Δ_y .

Отсюда для стационарных СтС нормальные стационарные СтП — если они существуют, то $m_t = m^*$, $K_t = K^*$, $K(t_1, t_2) = k(\tau)$ ($\tau = t_1 - t_2$), — определяются уравнениями [1, 6, 7]:

$$\left. \begin{aligned}
 a_1(m^*, K^*) &= 0; \quad a_2(m^*, K^*) = 0; \\
 \dot{k}_\tau(\tau) &= a_{21}(m^*, K^*) K^{*-1} k(\tau); \quad k(0) = K^* \quad (\forall \tau > 0); \\
 k(\tau) &= k(-\tau)^T \quad (\forall \tau < 0).
 \end{aligned} \right\} \tag{31}$$

При этом необходимо, чтобы матрица $a_{21}(m^*, K^*) = a_{21}^*$ была асимптотически устойчивой.

В случае СтС (27) уравнения МНА переходят в уравнения МСЛ [1, 6, 7]:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{m}_t &= a_1(m_t, K_t, t), & m_0 &= m(t_0); \\
 \dot{K}_t &= k_1^a(m_t, K_t, t) K_t + K_t k_1^a(m_t, K_t, t)^T + \sigma_0(t), \quad K_0 = K(t_0); \\
 \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K(t_1, t_2) K_{t_2} k_1^a(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T, & K(t_1, t_2) &= K_{t_1},
 \end{aligned} \right\} \tag{32}$$

где

$$a(Y_t, t) = a_0(m_t, K_t) + k_1^a(m_t, K_t) Y_t^0;$$

$$k_1^a(m_t, K_t, t) = \left[\left(\frac{\partial}{\partial m_t} \right) a_0(m_t, K_t, t)^T \right]^T; \\ b(Y_t, t) = b_0(t); \quad \sigma(Y_t, t) = b_0(t)\nu(t)b_0(t)^T = \sigma_0(t).$$

При условии асимптотической устойчивости матрицы $k_1^a(m^*, K^*)$ для стационарных СтС в основе МСЛ лежат уравнения (31), записанные в виде

$$\left. \begin{aligned} a_0(m^*, K^*) &= 0; \quad k_1^a(m^*, K^*) K^* + K^* k_1^a(m^*, K^*)^T + \bar{\sigma}_0 = 0; \\ \dot{k}_\tau(\tau) &= k_1^a(m^*, K^*) k(\tau); \quad k(0) = K^* \quad (\forall \tau > 0); \\ k(\tau) &= k(-\tau)^T \quad (\forall \tau < 0). \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Теорема 3. Если существуют интегралы (30), то уравнения (28) и (29) лежат в основе нестационарных алгоритмов МАМ для негауссовых СтС (26), а уравнения (32) — для негауссовых СтС (27).

Теорема 4. Если СтС (26) и (27) стационарны и существует стационарный нормальный процесс и матрица a_{21}^* асимптотически устойчива, то уравнения (31) и (33) лежат в основе стационарных алгоритмов МАМ.

Наконец, отметим, что для гауссовых СтС алгоритмы упрощаются, если принять $c(Y_t, t, v) \equiv 0$ в (26) и $V = V_0$, $\nu^V = v^{V_0}$ в (27).

Теперь рассмотрим дискретную СтС, описываемую уравнениями вида

$$Y_{k+1} = a_k(Y_k) + b_k(Y_k)V_k^d \quad (k = 1, 2, \dots). \quad (34)$$

Здесь Y_k — $(p \times 1)$ -мерный вектор состояния, $Y_k \in \Delta_y$ (Δ_y — многообразие состояний); $a_k(Y_k)$ и $b_k(Y_k)$ — векторно-матричные бесселевы функции дробного порядка размерности $(p \times 1)$ и $(p \times m)$ соответственно; через V_k^d обозначен векторный дискретный шум, обладающий интенсивностью ν_k^d . В случае аддитивного шума, когда $b_k(Y_k) = b_{0k}$, уравнение (34) примет вид:

$$Y_{k+1} = a_k Y_k + b_{0k} V_k^d. \quad (35)$$

В [9] показано, что в основе МНА лежат следующие соотношения и уравнения:

$$g_{1k}^N(\lambda) = \exp \left\{ i\lambda m_k - \frac{1}{2} \lambda^T K_k \lambda \right\}; \quad g_{k_1 k_2}^N = \exp \left\{ i\bar{\lambda}^T \bar{m}_2 - \frac{1}{2} \bar{\lambda}^T \bar{K}_2 \bar{\lambda} \right\}; \quad (36)$$

$$m_{k+1} = a_{1k} = M_{\Delta_y}^N a_k; \quad m_1 = M_{\Delta_y}^N Y_1; \quad (37)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{k+1} = a_{2k} &= M_{\Delta_y}^N [a_k a_k^T] - [M_{\Delta_y}^N a_k] [M_{\Delta_y}^N a_k^T] + M_{\Delta_y}^N [b_k \nu_k^d b_k^T]; \\ K_1 &= M_{\Delta_y}^N Y_1^0 Y_1^{0T}; \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

$$\left. \begin{array}{l} K(l, h) = a_{3k} = M_{\Delta_y}^N Y_l^0 a_h (Y_h)^T ; \quad K(l, l) = K_l \text{ при } l < h ; \\ K(l, h) = K(h, l)^T \text{ при } l > h . \end{array} \right\} \quad (39)$$

В основе МСЛ для (35) после статистической линеаризации функции $a_k(Y_k)$ согласно

$$a_k(Y_k) = a_{0k}(m_k, K_k) + k_{1k}^a(m_k, K_k) Y_k^0 \quad (40)$$

будут лежать уравнения:

$$m_{k+1} = a_{0k}, \quad m(1) = m_1; \quad (41)$$

$$K_{k+1} = k_{1k}^a K_k (k_{1k}^a)^T + b_{0k} \nu_k^d b_{0k}^T, \quad K(1) = K_1; \quad (42)$$

$$\left. \begin{array}{l} K(l, h+1) = K(l, h) (k_{1h}^a)^T ; \quad K(l, l) = K_l \text{ при } l < h ; \\ K(l, h) = K(h, l)^T \text{ при } l > h . \end{array} \right\} \quad (43)$$

Для определения стационарных СтП согласно МНА и МСЛ с характеристиками

$$m_k = m^*; \quad K_k = K^*; \quad K(l, h) = k^*(r) \quad (r = h - l) \quad (44)$$

используются уравнения:

$$m^* = a_{1k}^*(m^*, K^*); \quad (45)$$

$$K^* = a_{2k}^*(m^*, K^*); \quad (46)$$

$$K^* = k_1^a K^* (k_1^a)^T + b_0 \nu_k^d b_0^T; \quad (47)$$

$$k^*(r+1) = k^*(r) (k_1^a)^T, \quad k^*(0) = K^*. \quad (48)$$

Таким образом, если существуют a_{1k} , a_{2k} и a_{3k} , то в основе нестационарных МНА и МСЛ лежат уравнения (36)–(43) (**теорема 5**), а в основе дискретных нестационарных МНА и МСЛ — уравнения (44)–(48) (**теорема 6**).

6 Символьное аналитическое моделирование нормальных процессов в непрерывных и дискретных стохастических системах

Для алгоритмизации МНА необходимо уметь вычислять следующие интегралы:

$$I_0^a = I_0^a(m_t, K_t, t) = a_1(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N [a(Y_t, t)]; \quad (49)$$

$$I_1^a = I_1^a(m_t, K_t, t) = a_{21}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N [a(Y_t, t) Y_t^{0T}]; \quad (50)$$

$$I_0^{\bar{\sigma}} = I_0^{\bar{\sigma}}(m_t, K_t, t) = a_{22}(m_t, K_t, t) = M_N [\bar{\sigma}(Y_t, t)],$$

а для МСЛ достаточно вычислить (49), причем интеграл (50) вычисляется по формуле [1, 6, 7]:

$$k_1^a = k_1^a(m_t, K_t, t) = \left[\left(\frac{\partial}{\partial m_t} \right) I_0^a(m_t, K_t, t)^T \right]^T.$$

Как следует из уравнений МНА, необходимо уметь вычислять следующие интегралы:

$$I_{0k}^a = I_{0k}^a(m_k, K_k) = M_{\Delta_y}^N[a_k(Y_k)]; \quad (51)$$

$$I_{1k}^a = I_{1k}^a(m_k, K_k) = M_{\Delta_y}^N[a_k(Y_k) Y_k^{0T}]; \quad (52)$$

$$I_{0k}^\sigma = I_{0k}^\sigma(m_k, K_k) = M_{\Delta_y}^N[\sigma(Y_k)] \quad (\sigma(Y_k) = b_k \nu_k^d b_k^T).$$

Для МСЛ достаточно вычислить интеграл (51), причем интеграл (52) вычисляется по формуле:

$$k_{1k}^a = k_{1k}^a(m_k, K_k) = \left[\frac{\partial}{\partial m_k} I_{0k}^a(m_k, K_k)^T \right]^T.$$

Уравнения МНА (МСЛ) содержат интегралы I_0^a , I_1^a и I_0^σ в виде соответствующих коэффициентов. Поэтому процедура вычисления интегралов должна быть согласована с методом численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений для m_t , K_t и $K(t_1, t_2)$. Эти коэффициенты допускают дифференцирование по m_t и K_t , так как под интегралом стоит сглаживающая нормальная плотность.

В [10] изложены алгоритмы дискретного аналитического и статистического моделирования типовых распределений (в том числе нормальных) в нелинейных СтС на многообразиях. Алгоритмы дискретного аналитического и статистического моделирования для СтС с СБН, а также смешанные алгоритмы различной степени точности относительно шага интегрирования также представлены в [10].

Символьные алгоритмы являются актуальным и интенсивно развивающимся научным направлением, возникшим на пересечении информатики и математики в середине прошлого века [11, 12]. Часто встречающимися синонимами термина «символьные алгоритмы» являются: «компьютерная алгебра», «символьные вычисления», «символьные методы», «аналитические вычисления», «формальные вычисления». Компьютерная алгебра — наука об эффективных методах и алгоритмах обработки математических объектов на ЭВМ. Впервые значимые результаты в компьютерной алгебре были получены в теории базисов Гребнера, факторизации многочленов, интегрировании [12, 13]. Сегодня круг задач, в которых находят применение методы компьютерной алгебры, непрерывно

расширяется. К таким задачам можно отнести вычисления топологических инвариантов многообразий, узлов, алгебраических кривых, когомологий различных математических объектов, арифметических инвариантов колец целых элементов в полях алгебраических чисел.

Главным прикладным результатом работ в рассматриваемой области служат программные системы компьютерной алгебры (СКА), или Computer Algebra System (CAS). В настоящее время разработано множество СКА для разных классов решаемых задач [14]. Принято разделять СКА на следующие пять уровней:

- (1) встроенные средства различной степени универсальности для определенной системы программирования (например, Basic, C, C++, C#, Pascal, PL/1);
- (2) специальные языки программирования (Fortran, ISETL, Prolog, ...);
- (3) узкоспециализированные библиотеки подпрограмм (SSP, NAG, ПНП-БИМ, ...);
- (4) специальные пакеты прикладных программ (S-Plus, XploRe, SAS, Dynamics, StatGraf, SPSS, BMDP, Systat, ...);
- (5) общие универсальные математические системы (MatLab, Maple, Mathematica, MathCAD, Reduce).

Системы компьютерной алгебры работают с базовыми типами в виде математических объектов: чисел, выражений и т. п. Числа могут быть длинными, рациональными, комплексными, алгебраическими (задаются своим минимальным многочленом, интервалом на прямой или областью в комплексной плоскости, где содержится единственный корень данного многочлена). Математические выражения представляют собой функции, уравнения, производные, интегралы, векторы, матрицы, тензоры. В качестве объектов СКА рассматриваются также функциональные, дифференциальные поля; тригонометрические функции; матричные кольца.

В работе СКА можно выделить следующие типовые шаги:

- математические объекты и настроечные параметры задаются на входном языке системы в виде символьных выражений;
- СКА анализирует и переводит символьные выражения во внутреннее представление;
- символьное ядро системы выполняет требуемые преобразования или вычисления и выдает ответ в математической нотации, при этом алгоритмы внутренних преобразований имеют алгебраическую природу.

Функции ядра СКА могут быть реализованы на машинно-ориентированном языке в связи с требованиями высокой производительности. У некоторых СКА оптимизация машинного кода обеспечивается с помощью частичной реализации функциональности на языке ассемблер или даже аппаратном уровне. Ядро

обеспечивает выполнение аналитических преобразований математических выражений. Объем ядра часто ограничивают для сохранения производительности, но к нему добавляют библиотеки дополнительных функций. У большинства СКА алгоритмы вычислений и программные модули ядра являются ноу-хау разработчиков и относятся к разряду тщательно скрываемых данных.

Библиотеки специализированных программных модулей и функций, пакеты расширения содержат систематизированные по назначению реализации алгоритмов обработки абстрактных объектов, решения типовых математических задач. Библиотеки и пакеты функционально расширяют ядро, а также обеспечивают возможности программирования алгоритмов, часто на языках программирования высокого уровня.

Интерфейсные оболочки обеспечивают поддержку всех функций, необходимых для информационных и управляющих взаимодействий между системой и пользователями, в том числе ввод, редактирование, сохранение, обмен программами, использование разных аппаратных средств. У большинства СКА интерфейсные оболочки разные для разных операционных систем (ОС), при этом ведущие системы компьютерной алгебры работают без перекомпиляции исходного кода как на различных аппаратных платформах, так и под управлением разных операционных систем; пользовательские интерфейсы обеспечивают похожие визуальные сценарии работы в СКА на разных компьютерах, в разных ОС [12].

Используя современные СКА, можно выполнять в аналитической форме [12]:

- упрощение выражений или приведение к стандартному виду;
- подстановки символьных и численных значений в выражения;
- выделение общих множителей и делителей;
- раскрытие произведений и степеней, факторизацию;
- разложение на простые дроби;
- нахождение пределов функций и последовательностей;
- операции с рядами;
- дифференцирование в полных и частных производных;
- нахождение неопределенных и определенных интегралов;
- анализ функций на непрерывность;
- поиск экстремумов функций и их асимптот;
- операции с векторами;
- матричные операции;
- нахождение решений линейных и нелинейных уравнений;
- символьное решение задач оптимизации;
- алгебраическое решение дифференциальных уравнений;

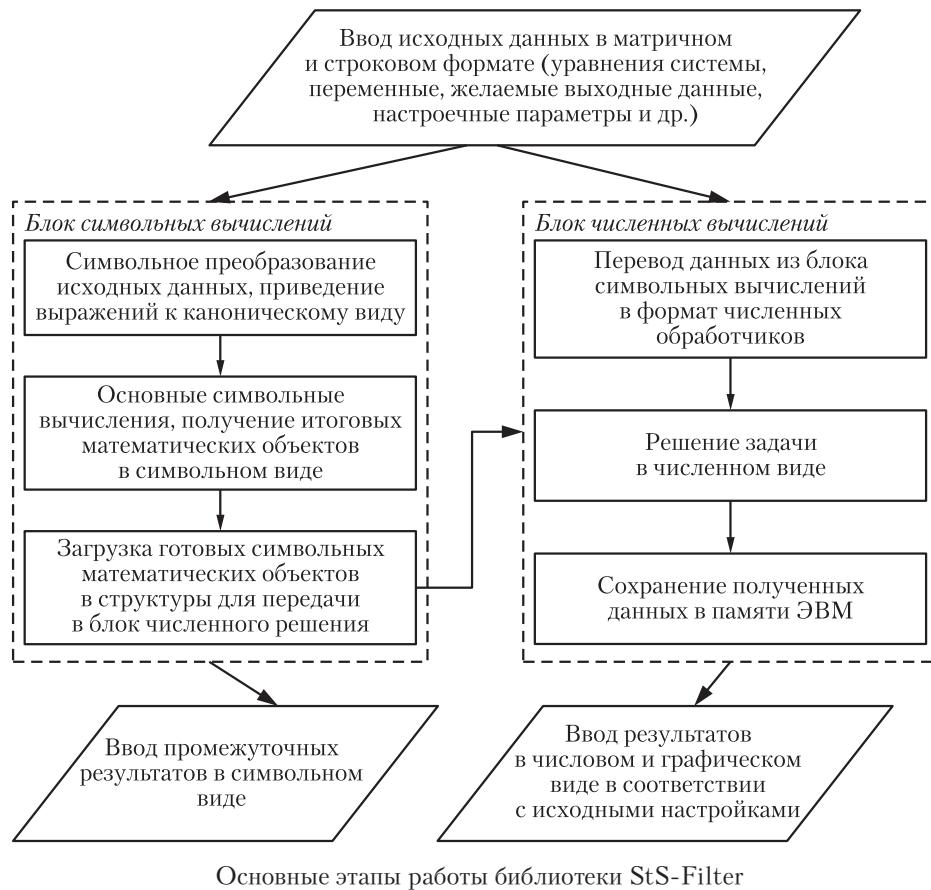
- интегральные преобразования;
- прямое и обратное быстрое преобразование Фурье;
- интерполяцию, экстраполяцию и аппроксимацию;
- статистические вычисления;
- машинное доказательство теорем.

Большинство СКА в современной реализации содержат все составляющие языков программирования высокого уровня. Лидерами СКА являются Mathematica и Maple — мощные системы с собственными ядрами, оснащенные развитым пользовательским интерфейсом и обладающие разнообразными графическими и редакторскими возможностями. Широкое распространение в настоящее время имеют и другие СКА: Derive, Maxima, Axiom, Reduce, MuPAD. Особое место занимает система MATLAB, объединяющие мощные средства для численных решений, аналитических решений, программирования, графического вывода информации, распространения собственных разработок в виде готовых исполняемых файлов.

Далеко не каждая математическая задача имеет аналитическое решение, а множество практически ценных задач и не могут быть формализованы настолько, чтобы решаться исключительно аналитическими методами. В ИПИ РАН накоплен большой опыт разработки информационных технологий, в том числе использующих символьные вычисления, для обработки информации в СтС [15–18]. К таким инструментальным средствам можно отнести следующие: «СтС-анализ» (1989–1990, 2004–2007), «СтС-Фильтр» (1991, 2004–2007), «СтС-Модель» (1993, 2007), NALIB (1991–1993), «СтС-СМА» (2005–2007), «СтС.CALS-анализ» (2012–2015). В настоящее время в качестве платформы для разрабатываемых продуктов используется система MATLAB, которая обладает мощными средствами для численных решений, графического вывода информации и включает в свой состав ядро системы компьютерной алгебры Maple для символьных вычислений. Большинство программных продуктов имеют гибридную структуру, включающую в состав блоки для символьных и численных решений (см. рисунок). Наличие блока символьных вычислений предоставляет следующие преимущества:

- расширение диапазона решаемых задач (универсальности пакета);
- переход к численному решению на более поздних шагах методов обработки информации в СтС;
- удобство ввода исходных данных (уравнений) в символьном виде.

На первом шаге блока символьных вычислений осуществляется символьное преобразование введенных пользователем данных. Эта обработка, необходимая для дальнейшего функционирования системы, основана на методах упрощения алгебраических выражений [11], в частности приведению выражения к каноническому виду. На данном этапе активно применяются функции ядра Maple из системы MATLAB.



На втором шаге блока символьных вычислений реализуются основные алгоритмы символьного решения подзадач анализа СтС. Например, вывод уравнений для вероятностных моментов при использовании степенных разложений и МНА в соответствии со следующими выражениями:

$$\varphi(Y) = Y_1^{\nu_1} \cdots Y_n^{\nu_n};$$

$$\varphi_0(m, K) = \alpha_\nu = m_p \alpha_{\nu-e_p} + \sum_{r=1}^n \nu_r k_{pr} \alpha_{\nu-e_p-e_r} - k_{pp} \alpha_{\nu-2e_p},$$

где $\alpha_0 = 1$; $\alpha_{e_p} = m_p$; $\nu = [\nu_1 \cdots \nu_n]^T$; $|\nu| = \nu_1 + \cdots + \nu_n$; $e_p = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T$; $k_p = [k_{p1} \cdots k_{pn}]$ ($p = 1, \dots, n$); $K = [k_{pq}]$ ($p, q = 1, \dots, n$).

Перевод данных из блока символьных вычислений в блок численных вычислений представляет собой нетривиальную задачу при условии сохранения универсальности программного пакета. В блоке численных вычислений используются функции MATLAB для численного решения систем дифференциальных уравнений. Существенным преимуществом MATLAB является наличие мощных средств вывода итоговой информации в графическом виде.

7 Аналитическое моделирование осциллятора Бесселя дробного порядка в стохастической среде

Рассмотрим двумерную СтС, описывающую динамику ОБДП в стохастической среде [1]:

$$\ddot{Z} + \omega_0^2 f_n(Z, t) = L_0 - 2\varepsilon\omega_0 \dot{Z} + X(t).$$

Здесь $f_n(Z)$ — БНДП; L_0 — регулярный постоянный момент; $-2\varepsilon\omega_0 \dot{Z}$ — линейный демпфирующий момент; $X(t)$ — широкополосный, в общем случае негауссовский, стохастический момент с известными вероятностными характеристиками.

Уравнения МСЛ (32) и (33) при $Y_1 = Z$, $Y_2 = \dot{Z}$, $\mathbf{M}Y_1 = m_1$, $\mathbf{M}Y_2 = m_2$, $\mathbf{M}Y_1^{02} = D_1$, $\mathbf{M}Y_2^{02} = D_2$, $\mathbf{M}Y_1^0 Y_2^0 = K_{12}$ и $X(t) = V$ имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_1 &= m_2; & \dot{m}_2 &= -\omega_0^2 \varphi_0^{f_n}(m_1, D_1, t) + L_0(t) - 2\varepsilon\omega_0 m_2; \\ m_1(t_0) &= m_{10}; & m_2(t_0) &= m_{20}, \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{D}_1 &= 2K_{12}; & \dot{D}_2 &= -2 \left[\omega_0^2 \varphi_0^{f_n}(m_1, D_1, t) K_{12} + 2\varepsilon\omega_0 D_2 \right] + \nu^V; \\ \dot{K}_{12} &= D_2 - \omega_0^2 k_1^{f_n}(m_1, D_1, t) D_1 - 2\varepsilon\omega_0 K_{12}; \\ D_1(t_0) &= D_{10}; & D_2(t_0) &= D_{20}; & K_{12}(t_0) &= K_{120}. \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

Здесь $\varphi_0^{f_n}(m_1, D_1, t)$ и $k_1^{f_n}(m_1, D_1, t)$ — коэффициенты МСЛ БНДП f_n , вычисляемые по формулам (2) и (3); ν^V — интенсивность белого шума V .

Для широкополосного процесса $X(t)$ и $\varepsilon\omega_0 > 0$ с ковариационной функцией

$$K^x(t_1, t_2) = D_x(t_1) e^{-\alpha|t_1-t_2|} [\cos(t_1 - t_2) + \gamma \sin \omega_0 |t_1 - t_2|] \quad (55)$$

процесс $X(t)$ можно заменить эквивалентным белым шумом с эквивалентной интенсивностью [6, 7]:

$$\nu^X(t) = 2D_x(t) (\gamma\omega_0 + \alpha) \beta^{-2} \quad (\beta^2 = \omega_0^2 + \alpha^2). \quad (56)$$

Отсюда при $\varepsilon > 0$, $L_0 = 0$ в стационарном режиме имеем:

$$m_1^* = 0; \quad m_2^* = 0; \quad K_{12}^* = 0; \quad D_2^* = \frac{\nu^*}{4\varepsilon\omega_0^2}; \quad (57)$$

$$k_1^{f_n}(0, D_1) D_1 - \frac{\nu^*}{4\varepsilon\omega_0^4} = 0. \quad (58)$$

Таким образом, при $\varepsilon > 0$, $L_0 = 0$ ОБДП совершают стохастические некоррелированные колебания с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями, определяемыми согласно (56)–(58).

Для высокодобротных ОБДП, когда $\varepsilon \gg 1$, колебания носят квазигармонический характер с эффективной частотой

$$\omega_{\text{эфф}}^{f_n} = \omega_0 \sqrt{k_1^{f_n}(0, D_1^*)}. \quad (59)$$

Помехоустойчивость, определяемая вероятностью пересечения процессом $Y_1(t)$ уровня y_1^* , вычисляется по известной формуле Болотина [19]:

$$P(t) = 1 - \int_0^t N_+(y_1^*, \tau) d\tau, \quad (60)$$

где $N_+(y_1^*, \tau)$ — число положительных пересечений уровня y_1^* в единицу времени. Для квазигармонических колебаний под $N_+(\cdot)$ понимают среднее число выбросов огибающей, поэтому

$$N_+(y_1^*, \tau) = N_+(y_1^*) = \frac{\omega_{\text{эфф}}}{\sqrt{2\pi}} (D_1^*) \frac{y_1^*}{D_1^*} \exp\left(-\frac{y_1^{*2}}{2D_1^*}\right). \quad (61)$$

В основу инструментального программного обеспечения для решения задач надежности и безопасности положены уравнения (53)–(61).

8 Заключение

Разработано методическое и алгоритмическое обеспечение символьного аналитического моделирования нормальных процессов в гауссовских и негауссовских СтС с БНДП (сферическими, модифицированными сферическими и нелинейностями Эйри) на основе МНА (МСЛ). В его основе лежат представления нелинейностей степенными и Эрмитовыми многочленами. Особое внимание удалено символическим алгоритмам.

В качестве тестового примера рассмотрена помехоустойчивость ОБДП в стохастической среде.

Алгоритмы положены в основу разрабатываемого инструментального программного обеспечения для решения задач надежности и безопасности систем и средств информатики и управления.

Результаты допускают обобщение на случай аппроксимации БНДП многочленными, дробно-рациональными и другими представлениями, а также для бесселевых СтС дробного порядка с широкополосными (в том числе автокоррелированными) и узкополосными возмущениями.

Литература

1. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование процессов в динамических системах с цилиндрическими бесселевыми нелинейностями // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 4. С. 39–49.
2. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными бесселевыми нелинейностями дробного порядка // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 55–65.
3. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: ГИФМЛ, 1963. 1100 с.
4. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича, И. Стигана. — М.: Наука, 1979. 832 с.
5. Попов Б. А., Теслер Г. С. Вычисление функций на ЭВМ. — Киев: Наукова Думка, 1984. 599 с.
6. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с.
7. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
8. Синицын И. Н., Синицын В. И. Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации распределений в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
9. 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.
10. 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.
11. Компьютерная алгебра: Символьные и алгебраические вычисления / Пер. с англ.; Под ред. Б. Бухбергера, Дж. Коллинза, Р. Лооса. — М.: Мир, 1986. 392 с. (Computer algebra: Symbolic and algebraic computation / Eds. B. Buchberger, G. E. Collins, R. Loos, R. Albrecht. — 2nd. ed. — Wien–New York: Springer-Verlag, 1983. 410 p.)
12. Таранчук В. Б. Основные функции систем компьютерной алгебры. — Минск: БГУ, 2013. 59 с.
13. Дэвенпорт Дж., Сирэ И., Турнье Э. Компьютерная алгебра / Пер. с фр. — М.: Мир, 1991. 352 с.

14. Дьяконов В. П. Энциклопедия компьютерной алгебры. — М.: ДМК Пресс, 2009. 1264 с.
15. Синицын И. Н., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Куценко А. В. Развитие методического и программного обеспечения на основе символьных вычислений для исследования стохастических систем // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'07): Тр. VI Междунар. конф., 2007. CD-ROM. С. 1447–1462.
16. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Агафонов Е. С. Символьное математическое обеспечение для анализа и моделирования стохастических систем, основанное на канонических разложениях случайных функций // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'09): Тр. VIII Междунар. конф., 2009. CD-ROM. С. 1059–1072.
17. Синицын И. Н. Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. 768 с.
18. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Белоусов В., Сергеев И. В. Компьютерное моделирование стохастических систем на базе канонических разложений // Кибернетика и высокие технологии XXI века (С & Г 2010): Сб. докл. XI Междунар. науч.-технич. конф. — Воронеж: Саквоее, 2010. Т. 2. С. 798–809.
19. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. — М.: Стройиздат, 1974. 255 с.

Поступила в редакцию 08.06.16

SYMBOLIC ANALYTICAL MODELING OF NORMAL PROCESSES IN STOCHASTIC SYSTEMS WITH COMPLEX FRACTION ORDER BESSEL NONLINEARITIES

I. N. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and V. V. Belousov

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

Abstract: Methodological and algorithmical support for analytical modeling of normal (Gaussian) processes in continuous and discrete stochastic systems (StS) with complex fractional order Bessel nonlinearities (spherical, modified spherical, and Airy) is given. The developed StS support is based on the methods of normal approximation and statistical linearization. For complex fractional order, Bessel nonlinearities series and Hermite representations are used. Special attention is paid to symbolic algorithms and software based on modern computer algebra systems (CAS). A short survey of CAS StS application is given. The test example is devoted to noise immunity of Bessel fraction order oscillator in stochastic media.

Keywords: Airy nonlinearity; Bessel function of fractional order; Bessel nonlinearity; method of analytical modeling; method of normal approximation; method

of statistical linearization; modificate spherical Bessel function; normal (gaussian) process; spherical Bessel function; stochastic process; symbolic analytical modeling

DOI: 10.14357/08696527160302

Acknowledgments

The work was supported by the Department for Nanotechnologies and Information Technologies (ONIT) of the Russian Academy of Sciences (project 0063-2015-0017 III.3).

References

1. Sinitsyn, I. N. 2015. Analiticheskoe modelirovanie protsessov v dinamicheskikh sistemakh s tsilindricheskimi besselevymi nelineynostyami [Analytical modeling of processes in dynamical systems with cylindric Bessel nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(4):39–49.
2. Sinitsyn, I. N. 2016. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi nelineynostyami drobnogo poryadka [Analytical modeling of processes in stochastic systems with complex fractional order Bessel nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(3):55–65.
3. Gradshteyn, I. S., and I. M. Ryzhik. 1963. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy*. Moscow: GIFML. 1100 p.
4. Abramovich, M., and I. Stigan, eds. 1979. *Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam* [Handbook of mathematical functions]. Moscow: Nauka. 832 p.
5. Popov, B. A., and G. S. Tesler. *Vychislenie funktsiy na EVM: Spravochnik* [Calculation of functions on the computer: Handbook]. Kiev: Naukova Dumka. 599 p.
6. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester–New York, NY: Jonh Wiley. 549 p.
7. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2000, 2004. *Teoriya stokhasticheskikh sistem* [Stochastic systems. Theory and applications]. Moscow: Logos. 1000 p.
8. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2013. *Lektsii po normal'noi i ellipsoidal'noi approksimatsii raspredeleniy v stokhasticheskikh sistemakh* [Lectures on normal and ellipsoidal approximation in stochastic systems]. Moscow: TORUS PRESS. 488 p.
9. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, and E. R. Korepanov. 2015. Modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi transendentnymi nelineynostyami [Modeling of normal processes in stochastic systems with complex transcendental nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(2):23–29.
10. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyah. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):4–16.
11. Buchberger, B., G. E. Collins, R. Loos, and R. Albrecht, eds. 1983. *Computer algebra: Symbolic and algebraic computation*. 2nd. ed. Wien–New York: Springer-Verlag. 410 p.
12. Taranchuk, V. B. 2013. *Osnovnye funktsii sistem komp'yuternoy algebry* [Basic functions of computer algebra]. Minsk: BGU. 59 p.

13. Davenport, J. H., Y. Siret, and E. Tournier. 1988. *Computer algebra: Systems and algorithms for algebraic computation*. San Diego, CA: Academic Press. 286 p.
14. D'yakonov, V. P. 2009. *Entsiklopediya komp'yuternoy algebry* [Computer algebra encyclopedia]. Moscow: DMK Press. 1264 p.
15. Sinitsyn, I. N., E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and A. V. Kutsenko. 2007. Razvitiye metodicheskogo i programmnogo obespecheniya na osnove simvol'nykh vychisleniy dlya issledovaniya stokhasticheskikh sistem. *Tr. VI Mezhdunar. konf. "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya" (SICPRO'07)*. 1447–1462. CD-ROM.
16. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and E. S. Agafonov. 2009. Simvol'noe matematicheskoe obespechenie dlya analiza i modelirovaniya stokhasticheskikh sistem, osnovannoe na kanonicheskikh razlozheniakh sluchaynykh funktsiy. *Tr. VIII Mezhdunar. konf. "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya" (SICPRO'09)*. 1059–1072. CD-ROM.
17. Sinitsyn, I. N. 2009. *Kanonicheskie predstavleniya sluchaynykh funktsiy i ikh prime-nenie v zadachakh komp'yuternoy podderzhki nauchnykh issledovaniy* [Canonical expansions of random functions and its application to scientific computer-aided support]. Moscow: TORUS PRESS. 768 p.
18. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and I. V. Sergeev. 2010. Komp'yuternoe modelirovanie stokhasticheskikh sistem na baze kanonicheskikh razlozheniyy. *Šbornik dokladov XI Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. "Kibernetika i vysokie tekhnologii XXI veka" (C & T 2010)*. Voronezh: NPF "Sakvoee." 2:798–809.
19. Bolotin, V. V. 1974. *Primenenie metodov teorii veroyatnostey i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy* [Applications of probability theory and reliability in building design]. Moscow: Stroyizdat. 255 p.

Received June 08, 2016

Contributors

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

Korepanov Eduard R. (b. 1966) — 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; Ekorepanov@ipiran.r

Belousov Vasiliy V. (b. 1977) — 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; VBelousov@ipiran.ru

ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЙ САМОСИНХРОННЫЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ПОРТ: ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Ю. А. Степченков¹, А. Н. Каменских², С. Ф. Тюрин³, Ю. Г. Дьяченко⁴

Аннотация: Создание элементов и устройств, сочетающих в себе как надежность (отказоустойчивость), так и энергоэффективность, является одним из важнейших направлений развития вычислительной техники. Применение самосинхронных (СС) схем обусловлено их уникальными свойствами — широким диапазоном работоспособности, самопроверяемостью относительно константных консервативных неисправностей (ККН), снижением энергопотребления. Наличие встроенных элементов рабочего контроля в СС-схемах сделало наиболее перспективными и активно развивающимися методы обеспечения активной отказоустойчивости. Однако для некоторых областей применения необходимо обеспечение пассивной отказоустойчивости. Рассматриваются ключевые отличия в методах обеспечения отказоустойчивости, предлагаются технические решения, реализующие наиболее эффективные методы, и проводится расчет их показателей надежности, а также сравнение с применением комплексных показателей эффективности.

Ключевые слова: самосинхронные схемы; надежность; отказоустойчивость; отказобезопасность

DOI: 10.14357/08696527160303

1 Введение

Самосинхронные схемы — общее название для целого ряда классов цифровых схем, включающих независящие от скорости (speed-independent), нечувствительные к задержкам элементов и линий связи (delay-insensitive), квазинечувствительные к задержкам элементов и линий связи (quasi-delay insensitive). Каждый класс может существенно отличаться от другого по затратам оборудования, энергопотреблению, производительности и другим характеристикам. В большинстве работ, посвященных СС-схемам, отмечается снижение энергопотребления за

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

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, kamenskikh.anton@gmail.com

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, tyurinsergfeo@yandex.ru

⁴ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, uradia@mail.ru

счет отказа от синхронности (генератора синхроимпульсов и клокового дерева) и работы на пониженных напряжениях питания [1–4]; кроме того, индикатор, фиксирующий окончание переходных процессов в элементе, является одновременно и средством рабочего контроля, что позволяет выявить ряд неисправностей: как правило, речь идет о ККН. Актуальность создания энергоэффективных отечественных отказоустойчивых систем управления и вычислительной техники не нуждается в сложных доказательствах и достаточно очевидна, что подчеркивается перечнем критических технологий РФ от 2016 г. [5]. Применение для решения этой задачи СС-схем обусловлено их вышеописанными свойствами. Наличие самопроверяемости направило развитие научно-методического аппарата синтеза СС-схем в русло применения методов активной отказоустойчивости, однако для ряда критических областей применения цифровой электроники, таких как военная техника, медицина и аэрокосмическая техника, требуется применение методов пассивной отказоустойчивости, отличающихся тем, что повышение надежности достигается без задержек на ремонт или реконфигурацию. Проблемы применения методов пассивной отказоустойчивости в СС-схемотехнике исследованы в [6, 7]. В этой статье предлагаются варианты реализации отказоустойчивого последовательно-параллельного порта (ПП-порта) СС-микроядра (СС-МЯ), проводится их сравнение, даются рекомендации по проектированию отказоустойчивых СС-схем.

2 Самосинхронный последовательно-параллельный порт с активной отказоустойчивостью

Диагностические свойства СС-схем основываются на применении индикаторов, по сигналу которых можно определить окончание всех переходных процессов в схеме, в наиболее общем случае таким индикатором является С-элемент Маллера. Рассмотрим комбинационную СС-схему, полученную с помощью использования парафазного кодирования со спейсером (рис. 1).

Индикатор позволяет определить, в каком из двух состояний — рабочем (W) или спейсерном (S) — находится схема. Переключение индикатора означает смену выходного набора ($S \rightarrow W$, $W \rightarrow S$), переходы $W \rightarrow W$ или $S \rightarrow S$ запрещены. Таким образом, сигнал индикатора позволяет говорить об отсутствии определенного типа неисправностей, подробнее диагностические свойства рассмотрены в [8–10].

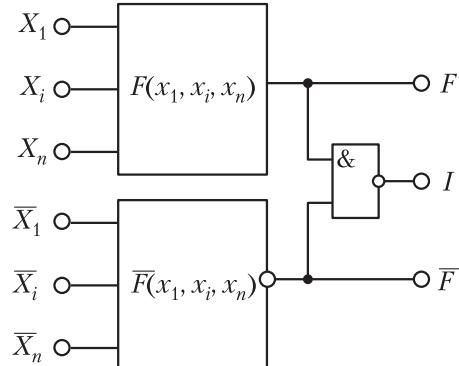


Рис. 1 Парафазные каналы данных с индикатором

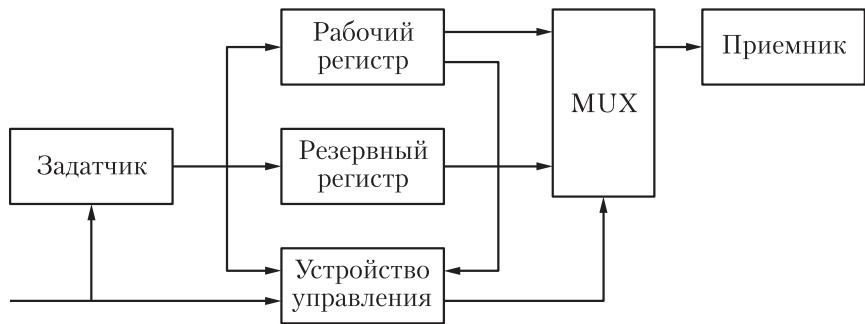


Рис. 2 Скользящее резервирование ПП-порта с прямым замещением

При нулевом типе спейсера неисправности типа константы единицы могут быть обнаружены при переходе $W \rightarrow S$, а неисправности типа константы нуля — $S \rightarrow W$. С помощью средств рабочего контроля СС-схем можно диагностировать только ККН выходов. Термин ККН определен в [8, с. 313]: под ККН понимается такая неисправность, которая не оказывает влияния на работу устройства в момент своего возникновения, в отличие от мутантных неисправностей, которые могут привести к непредсказуемым переключениям в схеме.

Резюмируя вышесказанное: любой метод, использующий диагностические свойства СС-схем, обеспечивает достоверное функционирование только в заданной модели ККН, вне рамок модели ККН СС-схемы не являются отказобезопасными.

Рассмотрим методы обеспечения отказоустойчивости, основанные на диагностических свойствах СС-схем. Скользящее резервирование с прямым замещением позволяет по сигналу триггера неисправности заменить неисправный блок резервным. Для ПП-порта, представляющего собой неоднородную структуру [11], заменяется весь регистр при отказе только одного из триггеров (рис. 2).

Сложность отказоустойчивого ПП-порта с замещением посредством сдвига (V1) 389 логических вентилей (ЛВ): два СС-регистра (228), мультиплексор (50), оставшиеся ЛВ — устройство управления (УУ) и цепи связи (табл. 1).

Коэффициент готовности (k) определяется как отношение времени наработки на отказ (T_o) к сумме T_o и среднего времени восстановления (T_v) с учетом вероятности безотказной работы (ВБР) дополнительного оборудования (P_{do}) и ВБР 2-го регистра. Время восстановления складывается из времени обнаружения, локализации и замены неисправного блока. Так как обнаружение неисправности происходит по затягиванию переходного процесса, то среднее время восстановления может быть вычислено на основе данных о быстродействии ПП-порта. За основу будет взята производительность при нормальных условиях (номинальное напряжение 5 В и температура 27 °C).

Таблица 1 Оценка сложности отказоустойчивого ПП-порта СС-МЯ

Элемент	Сложность, ЛВ	Количество	Итого
Мультиплексор	50	1	50
Триггер 1	6	2	12
Триггер 2	13	2	26
Триггер 3	12	12	144
Индикаторы регистра	23	2	46
Индикаторы мультиплексора	12	1	12
Устройство управления	99	1	99
Итого	—	—	389

Построим граф марковской цепи для расчета показателей надежности ПП-порта с активной отказоустойчивостью (рис. 3).

Для исключения неправильного срабатывания триггера неисправности период определения ошибки устанавливается в n раз больше длительности переходных процессов при нормальных условиях, в нашем случае $T_{\text{в}} = 4 \cdot 10^{-8}$ с. В расчетах используются следующие значения: интенсивность отказов $\lambda = 10^{-9} 1/\text{ч}$; время $t = 10^5$ ч;

$$k = \frac{T_o}{T_o + T_{\text{в}}} P_{\text{до}} = 0,98.$$

Второй способ организации саморемонта — скользящее резервирование посредством сдвига — применяется для однородных структур. Регистр, предложенный в [11], не является внутренне однородной структурой; следовательно, для эффективного использования саморемонта с замещением посредством сдвига необходимо перепроектировать регистр.

Одним из способов повышения эффективности методов активной отказоустойчивости является применение комбинированного резервирования, которое позволяет повысить достоверность функционирования на определенном интервале и коэффициент готовности.

3 Самосинхронный последовательно-параллельный порт с пассивной отказоустойчивостью

Если условия эксплуатации предполагают необходимость обеспечить устойчивость к произвольным отказам / неисправностям и отсутствие времени на рекон-

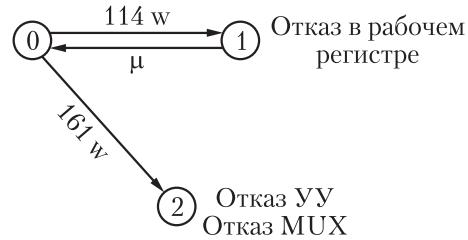


Рис. 3 Граф марковской цепи ПП-порта с активной отказоустойчивостью

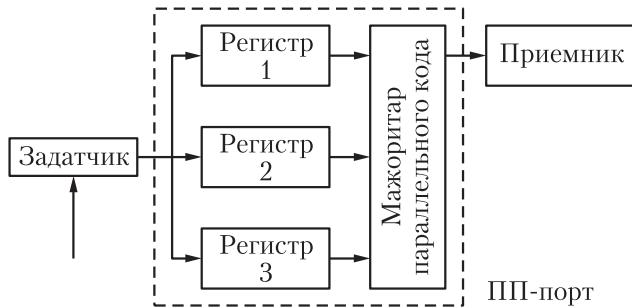


Рис. 4 Скользящее резервирование ПП-порта с прямым замещением

фигурацию и саморемонт, то предполагается использование методов обеспечения пассивной отказоустойчивости. Классическим методом обеспечения k -отказоустойчивости является мажоритарное резервирование с голосованием n -из- m , обеспечивающее $k = m - n$.

Подробно проблемы мажоритарного резервирования СС-схем исследованы в [7]. В этой статье предлагаются пассивно отказоустойчивые схемы, разработанные на основе предложенных в [12, 13] моделей и методов.

Мажоритарное резервирование СС-блоков из-за сложности дополнительного оборудования имеет оптимум на уровне 45–46 ЛВ (182 транзистора) для одного выхода. Однако на практике добиться такого разбиения блоков крайне затруднительно.

Отказоустойчивый ПП-порт с использованием мажоритарного резервирования может быть реализован двумя способами (V3-1 и V3-2): в первом случае мажоритируется весь регистр целиком (рис. 4), во втором — каждый триггер в отдельности.

Сложность варианта V3-1 составляет 414 логических вентилей. Сложность варианта V3-2 составляет 405 логических вентилей. Однако в этом случае не парируются отказы в индикаторах регистра (табл. 2).

В первом случае ВБР порта определяется по формуле:

$$P_{v31} = \left(3e^{-2 \cdot 4 \cdot 114\lambda t} - 2e^{-3 \cdot 4 \cdot 114\lambda t} \right) e^{-4 \cdot 72\lambda t}.$$

Таблица 2 Оценка сложности ПП-порта с мажоритарным резервированием

Элемент	Сложность, ЛВ	Количество	Итого
Мажоритары	72 (109)	1	72 (109)
Триггер 1	6	3	18
Триггер 2	13	3	39
Триггер 3	12	18	216
Индикаторы регистра	23	3 (1)	69 (23)
Итого	—	—	414 (405)

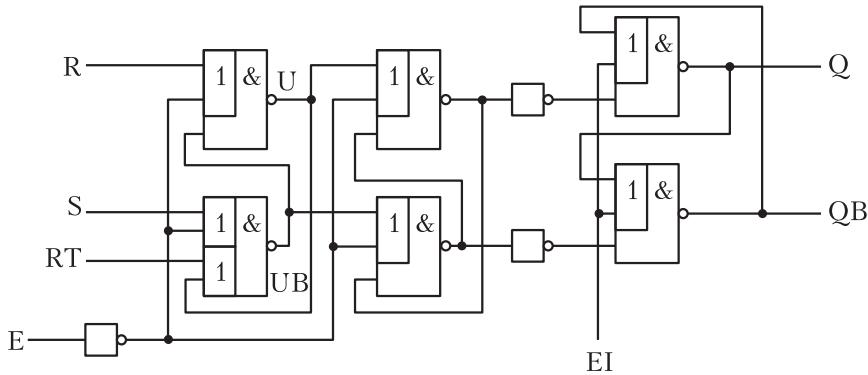


Рис. 5 Функциональная часть СС-триггера (без индикатора) с декомпозицией второй ступени для удовлетворения требованиям РТУ

Для второго случая применяется формула:

$$P_{v31} = \left(3e^{-2 \cdot 4 \cdot 13\lambda t} - 2e^{-3 \cdot 4 \cdot 13\lambda t}\right) \left(3e^{-2 \cdot 4 \cdot 12\lambda t} - 2e^{-3 \cdot 4 \cdot 12\lambda t}\right)^6 \times \\ \times \left(3e^{-2 \cdot 4 \cdot 6\lambda t} - 2e^{-3 \cdot 4 \cdot 6\lambda t}\right) e^{-4 \cdot 109\lambda t} e^{-4 \cdot 23\lambda t}.$$

Другой вариант реализации пассивно отказоустойчивых схем — это использование элементов, устойчивых к отказам (элементов с избыточным базисом). Однако из-за проектных ограничений в чистом виде этот вариант не реализуем [14].

В отказоустойчивом ПП-порте с использованием методики комбинированного резервирования на основе формальной системы вывода применяются специально разработанные отказоустойчивые элементы либо отказоустойчивые элементы с дублированием связей, которые обеспечивают устойчивость к произвольным однократным отказам транзисторов (резервирование на транзисторном уровне — РТУ) (рис. 5).

Сложность порта в этом случае равна сложности отказоустойчивого СС-реегистра. Всего 532 ЛВ, из которых 436 — это отказоустойчивые СС-триггеры, 96 — схема индикации на основе отказоустойчивых элементов (табл. 3).

Надежность элемента с избыточным базисом определяется надежностью используемой отказоустойчивой структуры, в случае технологии 4Т (парирование однократных неисправностей) по формуле:

$$P(t) = \left[e^{-4\lambda t} + 4e^{-3\lambda t} \left(1 - e^{-\lambda t}\right) \right]^n.$$

Таблица 3 Оценка сложности ПП-порта с комбинированным резервированием

Элемент	Сложность, ЛВ	Количество	Итого
Триггер 1	54	1	54
Триггер 2	22	1	22
Триггер 3	60	6	360
Индикаторы регистра	48	2	96
Итого	—	—	532

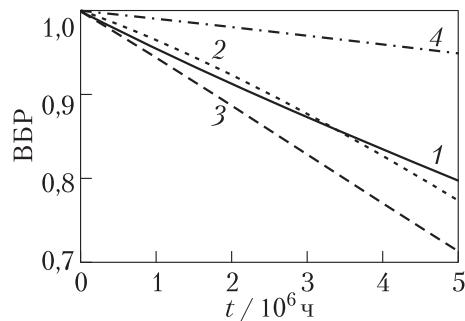


Рис. 6 Сравнение ВБР отказоустойчивых регистров с пассивной отказоустойчивостью:
1 — неотказоустойчивый ПП-порт; 2 — ПП-порт при мажоритировании триггеров; 3 — ПП-порт при мажоритировании регистров; 4 — ПП-порт на основе комбинированного резервирования

В случае комбинированного резервирования надежность определяется произведением ВБР отказоустойчивых элементов и ВБР неотказоустойчивых, мажоритированных, элементов:

$$P(t) = \left[e^{-4\lambda t} + 4e^{-3\lambda t} (1 - e^{-\lambda t}) \right]^{436} \left[e^{-4 \cdot 16\lambda t} + 3e^{-4 \cdot 12\lambda t} (1 - e^{-4 \cdot 4\lambda t}) \right]^6.$$

На рис. 6 представлено сравнение ВБР вариантов реализации ПП-порта с применением методов обеспечения пассивной отказоустойчивости, которое показывает, что наибольший прирост ВБР обеспечивает применение комбинированного резервирования.

Таким образом, реализация комбинированного резервирования требует в $\sim 1,3$ раза больше оборудования, но обеспечивает лучшую ВБР.

4 Заключение

Предложены реализации отказоустойчивого ПП-порта с разными способами резервирования, проведен анализ и оценка эффективности предложенных

решений. В случаях, допускающих остановку устройства для ремонта/реконфигурации, рекомендуется использовать методы обеспечения активной отказоустойчивости, так как они обеспечивают прирост надежности ценой меньших аппаратных затрат, однако необходимо учитывать, что они работают только в рамках адекватности модели ККН.

Улучшение комплексного показателя «энергозатраты–надежность» является одним из вызовов современной вычислительной техники [15]. Как результаты моделирования [16], так и тестовые испытания некоторых СС-устройств показывают значительное снижение энергопотребления относительно синхронных аналогов. Эффективное использование свойств СС-схем для повышения их надежности позволит значительно улучшить показатель «энергозатраты–надежность», что сделает применение отказоустойчивых СС-схем перспективным. Однако для достижения этой цели требуется совершенствование методов повышения надежности СС-схем.

Одним из таких подходов является использование гибкого логического тайм-аута (без жесткой аппаратной реализации), который позволит использовать методы обеспечения активной отказоустойчивости для устройств, не допускающих их остановку для ремонта/реконфигурации. Возможность использования такого подхода станет предметом исследования авторов настоящей статьи.

Литература

1. *Muller D. E., Bartky W. S.* A theory of asynchronous circuits // Symposium (International) on the Theory of Switching Proceedings. — Harvard University Press, 1959. Part 1. P. 204–243.
2. *Kuang W., Yuan J. S.* Low power operation using self-timed circuits and ultra-low supply voltage // 14th Conference (International) on Microelectronics Proceedings. — IEEE, 2002. P. 185–188.
3. *Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Петрухин В. С., Плеханов Л. П.* Самосинхронные схемы — ключ к построению эффективной и надежной аппаратуры долговременного действия // Наукометрические технологии, 2007. Т. 8. № 5-6. С. 73–89.
4. *Yakovlev A.* Energy-modulated computing // Design Automation & Test in Europe Conference & Exhibition Proceedings. IEEE, 2011. P. 1–6. https://www.researchgate.net/publication/224235958_Energy-modulated_computing.
5. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации № 899 от 7.07.2011. <http://www.kremlin.ru/supplement/988>.
6. *Kamenskikh A. N., Tyurin S. F.* Application of redundant basis elements to increase self-timed circuits reliability // Electrical and Electronic Engineering Conference (EICoRusNW): Proceedings of the 2014 IEEE NW Russia Young Researchers. — IEEE, 2014. P. 47–50.

7. Каменских А. Н., Степченков Ю. А., Тюрин С. Ф. Проблемы анализа полумодульности и энергонадежности отказоустойчивых самосинхронных схем // Электротехника, 2015. № 11. С. 27–32.
8. Варшавский В. И., Кишиневский М. А., Мараховский В. Б. и др. Автоматное управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах / Под ред. В. И. Варшавского. — М.: Наука, 1986. 398 с.
9. Варшавский В. И., Володарский В. Я., Мараховский В. Б. и др. Аппаратная и структурная организация средств контроля и восстановления в самосинхронном кольцевом канале // Автоматика и вычисл. техника, 1989. JS1. С. 61–68.
10. Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Рождественский Ю. В. и др. Самосинхронный вычислитель для высоконадежных применений // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2010: Сб. тр. / Под общ. ред. акад. А. Л. Стемпковского. — М.: ИППМ РАН, 2010. С. 418–423.
11. Степченков Ю. А., Петрухин В. С., Дьяченко Ю. Г. Опыт разработки самосинхронного ядра микроконтроллера на базовом матричном кристалле // Нано- и микросистемная техника, 2006. № 5. С. 29–36.
12. Kamenskih A. N. The synthesis technique of fault-tolerant self-timed circuits // Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRusNW): Proceedings of the 2016 IEEE NW Russia Young Researchers. — IEEE, 2016. P. 572–575.
13. Тюрин С. Ф., Каменских А. Н. Формальная система вывода резервированных КМДП-структур отказоустойчивых самосинхронных схем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2016. № 2(18). С. 120–135.
14. Степченков Ю. А., Денисов А. Н., Дьяченко Ю. Г., Гринфельд Ф. И., Филимоненко О. П., Морозов Н. В., Степченков Д. Ю. Библиотека элементов для проектирования самосинхронных полуузаказных БМК микросхем серий 5503/5507 и 5508/5509. — М.: ИПИ РАН, 2013. 319 с.
15. Mehta N. An ultra-low-energy, variation-tolerant FPGA architecture using component-specific mapping. — California Institute of Technology, 2012. PhD Thesis. 122 p.
16. Каменских А. Н. Моделирование влияния резервирования на энергопотребление самосинхронных схем // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика, 2015. № 4(31). С. 91–94.

Поступила в редакцию 15.08.16

FAULT-TOLERANT SELF-TIMED SERIAL-PARALLEL PORT: VARIANTS OF REALIZATION

Y. A. Stepchenkov¹, A. N. Kamenskih², S. F. Tyurin², and Y. G. Diachenko¹

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

²Faculty of Electrical Engineering, Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomol Prospekt, Perm 614990, Russian Federation

Abstract: The design of digital devices with both reliability and energy-efficiency is one of the important directions of information technologies development. The self-timed circuits have unique properties — width operation range, self-testing for stuck-at faults and energy-consumption decrease. The ability of self-test makes self-repair techniques better and more perspective for self-timed circuits. However, the fault-tolerance is necessary for some fields of application. The key difference between different techniques of reliability improvement is researched in this paper by the example of proposed technical solutions that realize most efficient designing methods. The usage of complex indices provides comparison of designs.

Keywords: self-timed; reliability; fault-tolerance; failsafe feature

DOI: 10.14357/08696527160303

References

1. Muller, D. E., and W. S. Bartky. 1959. A theory of asynchronous circuits. *Symposium (International) on the Theory of Switching Proceedings*. Harvard University Press. 1:204–243.
2. Kuang, W., and J. S. Yuan. 2002. Low power operation using self-timed circuits and ultra-low supply voltage. *14th Conference (International) on Microelectronics Proceedings*. IEEE. 185–188.
3. Stepchenkov, Yu. A., Yu. G. Djachenko, V. S. Petrukhin, and L. P. Plekhanov. 2007. Samosinkhronnye skhemy — klyuch k postroeniyu effektivnoy i nadezhnoy apparatury dolgovremennogo deystviya [Self-timed circuits are a key for developing an effective and reliable equipment with a permanent operation]. *Naukoemkie Tekhnologii* 8(5-6):73–89.
4. Yakovlev, A. 2011. Energy-modulated computing. *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition Proceedings*. IEEE. 1–6. Available at: https://www.researchgate.net/publication/224235958_Energy-modulated-computing (accessed August 29, 2016).
5. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii “Ob utverzhdenii prioritetnykh napravlenii razvitiya nauki, tekhnologiy i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologiy Rossiyskoy Federatsii” No. 899 ot 07.07.2011. Prilozhenie. [On approval

- of priority directions of development of science, technologies and technics in Russian Federation and list of critical technologies of the Russian Federation: The decree of the President of the Russian Federation No. 899 dated 07.07.2011. Supplement]. Available at: <http://www.kremlin.ru/supplement/988> (accessed August 29, 2016).
6. Kamenskikh, A. N., and S. F. Tyurin. 2014. Application of redundant basis elements to increase self-timed circuits reliability. *2014 IEEE NW Russia Young Researchers. Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRusNW) Proceedings*. IEEE. 47–50.
 7. Kamenskikh, A. N., Yu. A. Stepchenkov, and S. F. Tyurin. 2015. Problems of analysis of semimodularity and energy-reliability of resilient self-timed circuits. *Russ. Electrical Engineering* 86(11):646–650.
 8. Varshavskiy, V. I., M. A. Kishinevskiy, V. B. Marakhovskiy, et al. 1986. *Avtomatnoe upravlenie asinkhronnymi protsessami v EVM i diskretnykh sistemakh* [Automata control of asynchronous processes in computers and discrete systems]. Ed. V. I. Varshavskiy. Moscow: Nauka. 398 p.
 9. Varshavskiy, V. I., V. Ya. Volodarskiy, V. B. Marakhovskiy, et al. 1989. Apparatnaya i strukturnaya organizatsiya sredstv kontrolya i vosstanovleniya v samosinkhronnom kol'tsevom kanale [Hardware and structural organization of control and repair equipment in self-timed ring channel]. *Avtomatika i Vychisl. Tekhnika* [Automatic Control and Computer Sciences]. JS1:61–68.
 10. Stepchenkov, Yu. A., Yu. G. Djachenko, Yu. V. Rozhdestvenskiy, et al. 2010. Samosinkhronnyy vychislitel' dlya vysokonadezhnykh primeneniyy [Self-timed calculator for high reliable applications]. *Vserossiyskaya nauchno-tehnich. konf. "Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)."* Sbornik trudov [All-Russia Science & Technology Conference “Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development” Proceedings]. Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences. 418–423.
 11. Stepchenkov, Yu. A., V. S. Petrukhin, and Yu. G. Diachenko. 2006. Opyt razrabotki samosinkhronnogo yadra mikrokontrollera na bazovom matrichnom kristalle [Development experience of self-timed RISC-processor using uncommitted Logic Array]. *Nano-i Mikrosistemnaya Tekhnika* 5:29–36.
 12. Kamenskikh, A. N. 2016. The synthesis technique of fault-tolerant self-timed circuits. *2016 IEEE NW Russia Young Researchers. Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRusNW) Proceedings*. IEEE. 572–575.
 13. Tyurin, S. F., and A. N. Kamenskikh. 2016. Formal'naya sistema vydova rezervirovannykh KMDP-struktur otkazoustoychiviykh samosinkhronnykh skhem [Formal logic system for redundant CMOS structures of fault-tolerant self-timed circuits]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems] 2(18):120–135.
 14. Stepchenkov, Yu. A., A. N. Denisov, Yu. G. Djachenko, F. I. Grinfield, O. P. Filimonenko, N. N. Morozov, and D. Yu. Stepchenkov. 2013. *Biblioteka elementov dlya proektirovaniya samosinkhronnykh poluzakaznykh BMK mikroskhem seriy 5503/5507 i 5508/5509* [Gates library for designing of self-timed ASIC circuits using series of uncommitted BMK Logic Array 5503/5507 and 5508/5509]. Moscow: IPI RAN. 391 p.

15. Mehta, N. 2012. An ultra-low-energy, variation-tolerant FPGA architecture using component-specific mapping. California Institute of Technology. PhD Thesis. 122 p.
16. Kamenskikh, A. N. 2015. Modelirovaniye vliyaniya rezervirovaniya na energopotreblenie samosinkronnykh skhem [The simulation of influence of redundancy on energy-consumption of self-timed circuits]. *Vestnik Permskogo Universiteta. Matematika, Mekhanika, Informatika ser.* [Perm University Bulletin. Mathematics, mechanics, informatics ser.] 31(4):91–94.

Received August 15, 2016

Contributors

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

Kamenskikh Anton N. (b. 1991) — PhD student, assistant of the Faculty of Electrical Engineering, Department of Automation and Remote Control, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomol Prosp., Perm 614990, Russian Federation; kamenskikh.anton@gmail.com

Tyurin Sergey F. (b. 1953) — Doctor of Science in technology, professor, professor of the Faculty of Electrical Engineering, Department of Automation and Telemechanics, 29 Komsomol Prosp., Perm 614990, Russian Federation; tyurinsergeo@yandex.ru

Diachenko Yuri G. (b. 1958) — 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, Moscow 119333, Russian Federation; uradia@mail.ru

ЗАЩИТА БИЗНЕС-ЛОГИКИ ОТ АТАК НУЛЕВОГО ДНЯ*

А. А. Грушо¹, Д. В. Смирнов²

Аннотация: Работа посвящена построению архитектуры информационной системы (ИС), устойчивой к атакам нулевого дня из Интернета. Дано обоснование защищенности ИС от атак нулевого дня и приведено описание условий, при которых обеспечивается требуемая защищенность. Проанализирована архитектура ИС коммерческих производителей на предмет устойчивости к атакам нулевого дня, описана модель угроз ИС, доступной в Интернете, и разработаны методы реализации защиты ИС от атак нулевого дня.

Ключевые слова: информационная безопасность; атака нулевого дня; бизнес-логика; белые списки; черные списки; безопасная архитектура; сервер безопасности

DOI: 10.14357/08696527160304

1 Введение

У предприятий, ведущих коммерческую деятельность с использованием Интернета, ИС «видны» всему Интернету, т. е. большому числу лиц с точки зрения сетевого взаимодействия. Для безопасной работы электронного бизнеса предприятие должно решить ряд проблем, связанных с обменом данными между собой и своими клиентами в Интернете. Проблемы могут быть как техническими, связанными с затратами и сроками на построение инфраструктуры электронного бизнеса, так и регулятивными, т. е. связанными с законодательством отдельного государства.

Информационная система взаимодействует с окружением [1], которое, в свою очередь, может содержать угрозы предприятию (рис. 1).

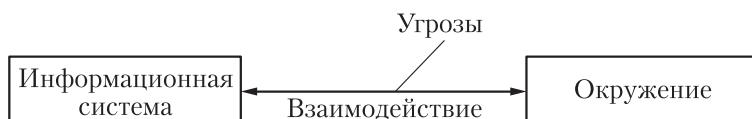


Рис. 1 Взаимодействие ИС с окружением

*Работа поддержана РФФИ (проект 15-07-02053).

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

²ПАО Сбербанк России, dvlsmirnov@sberbank.ru

В окружении ИС располагаются системы, известные или не известные предприятию, но представляющие риск для него. В этой связи должна быть предусмотрена ограниченная зависимость от информации, предоставленной извне. Информация, полученная из окружения ИС, может содержать в себе вредоносный код (ВК). Также индивиды, расположенные в данной области, могут осуществлять попытки проникновения в ИС предприятия.

Далее используются следующие понятия.

Бизнес-логика (БЛ) — основной компонент электронного бизнеса, т. е. та часть ИС, которая может инициировать создание, изменение, отправку на хранение данных. Бизнес-логика имеет интерфейсы для взаимодействия с другими компонентами ИС.

Презентационный слой — это компонент ИС, являющийся посредником между БЛ и клиентом. Как правило, на презентационном слое размещается код, обеспечивающий визуальный интерфейс (Java Script, HTML и т. д.) для клиента. В работе презентационный слой совмещается с демилитаризованной зоной (ДМЗ).

В области ДМЗ размещаются серверы, доступные всей сети Интернет. Точка входа в ИС предприятия находится в ДМЗ. Серверы, размещенные в данной области, находятся исключительно под управлением предприятия. Серверы, размещенные в ДМЗ, управляются только из внутренней сети.

Защищенный сегмент или внутренняя сеть — это сегмент, где размещены основные активы предприятия, т. е. БЛ и данные. Защищенный сегмент предполагает, что к размещенным в нем информационным ресурсам можно подключиться из внешнего мира только через серверы, размещенные в ДМЗ (рис. 2), и только если предприятие предполагает такой доступ.

Предполагается, что полномочия на внесение изменений в код БЛ есть только у предприятия. Архитектура ИС не предполагает, что клиент вправе вносить изменения в код БЛ (см. рис. 2).

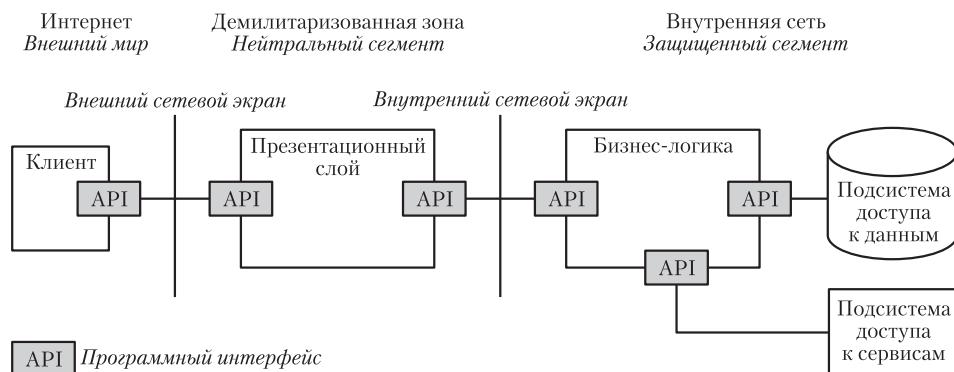


Рис. 2 Бизнес-логика, ее размещение и интерфейсы

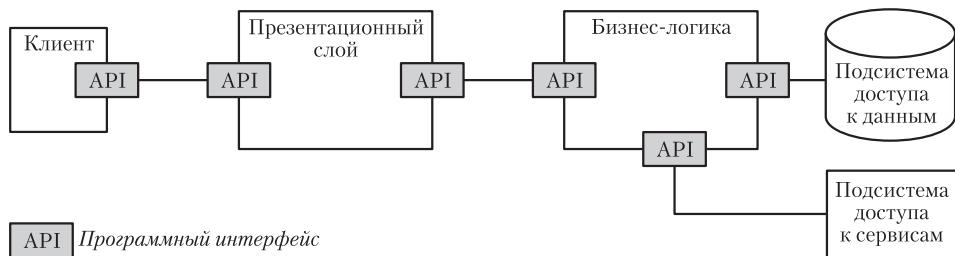


Рис. 3 Информационная система и ее окружение по версии Oracle

Заметим, что БЛ и подсистему доступа к данным и сервисам можно рассматривать как одно целое и размещать целиком в одном сетевом сегменте внутренней сети без применения сетевых экранов, потому что:

- (1) предполагается, что связь БЛ с подсистемой доступа к данным интенсивная и установка сетевого экрана приведет к деградации производительности;
- (2) любая транзакция по определению вызывает изменения в данных. Поскольку сетевой экран работает на уровне IP и TCP, то применение сетевого экрана для защиты от вредоносных транзакций неэффективно;
- (3) подсистема доступа к данным может быть совмещена с БЛ на одних и тех же узлах, например на грид-платформе. У грид-платформы отсутствует классическая система управления базами данных (СУБД) (Oracle, DB2, MS SQL и т. д.), а вычислительные узлы одновременно могут являться узлами хранения данных.

Задачи по обеспечению безопасности взаимодействия ИС с ее окружением решали различные авторы. Например, компания Oracle в документах по обеспечению безопасности серверов приложений предлагает использовать трехуровневую топологию [2]: презентационный слой (веб-сервис), БЛ и подсистемы доступа к базам данных (рис. 3).

Методы защиты от атак нулевого дня или от известных атак на БЛ компания Oracle не публикует.

Компания IBM для обеспечения безопасности предлагает использовать тоже трехуровневую топологию, но предлагает совмещение презентационного слоя и SOA (service-oriented architecture) шлюза в одной компоненте [3]. Шлюз обладает функциональностью XML-, JSON-валидатора и может выполнять проверку поступающих в БЛ команд (рис. 4).

Недостаток такого подхода заключается в том, что скорость развития веб-технологий выше, чем скорость развития технологий SOA-шлюзов. Это означает, что презентационный слой значительно чаще подвергается изменению и обновлению, нежели SOA-шлюзы. Кроме того, в случае если презентационный слой

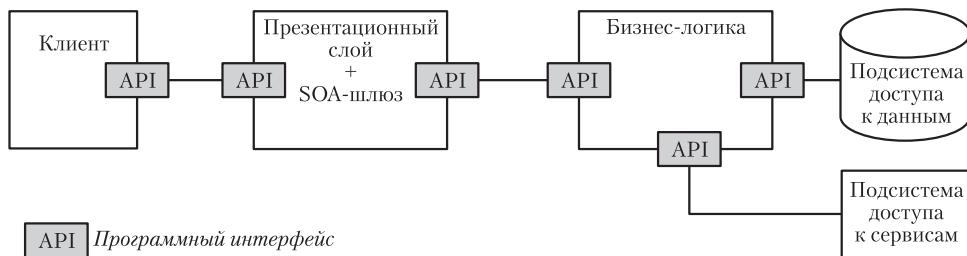


Рис. 4 Информационная система и ее окружение по версии IBM

будет скомпрометирован, то и SOA-шлюз попадет под влияние злоумышленника, поскольку размещен на одном сервере с презентационным слоем.

SAP предлагает трехуровневую архитектуру, аналогичную IBM. В качестве шлюзов у SAP есть продукты SAP Net Weaver Gateway или SAP Enterprise Portal [4]. Как и у IBM, у шлюзов SAP имеется функциональность по проверке данных, поступающих в БЛ, но шлюзы SAP имеют такие же недостатки, как и SOA-шлюзы IBM.

В общем случае коммерческие производители шлюзов не дают рекомендаций, как конструировать архитектуру безопасных ИС и с помощью каких методов и при каких условиях можно защититься от атак нулевого дня.

Также при построении ИС на основе «готовых» технологий и решений от производителей IBM, SAP, Oracle предприятие принимает на себя риск использования закрытого исходного кода. Для закрытия риска использования закрытого кода предприятию разумно произвести модернизацию архитектуры ИС.

Основная цель данной работы — это модернизация архитектуры ИС, которая при определенных условиях способна обеспечивать защиту БЛ от атак нулевого дня и обоснование такой защищенности.

2 Модель угроз

Архитектура ИС согласно рекомендациям Oracle, IBM и SAP имеет четыре основных компонента — клиент (клиент, злоумышленник), презентационный слой, БЛ и подсистемы доступа к данным и сервисам.

В контексте статьи стоит задача построения защиты электронного бизнеса от внешнего злоумышленника, а не анализ всех угроз ИС. Внутренний злоумышленник не рассматривается. Это означает, что злоумышленник, способный атаковать ИС, размещен в Интернете.

Атака из Интернета на БЛ ИС может происходить в двух случаях (рис. 5):

- (1) если атака идет от клиента;
- (2) если презентационный слой скомпрометирован.

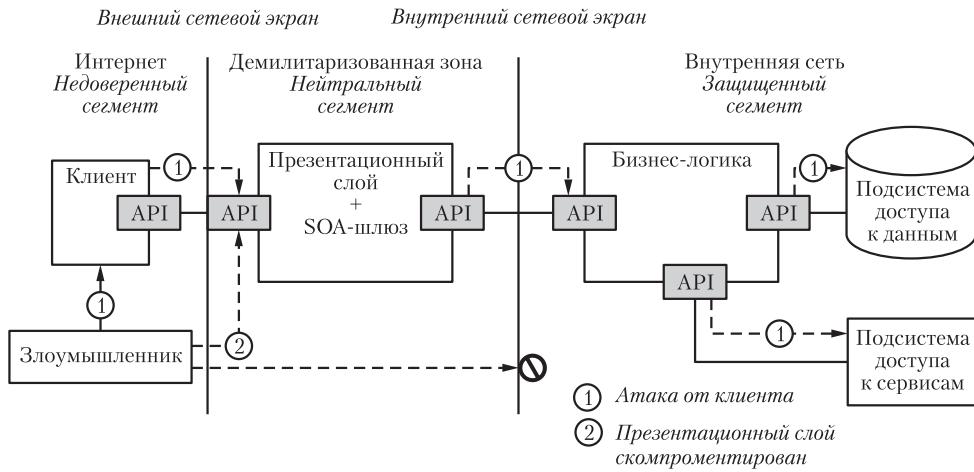


Рис. 5 Модель угроз ИС

3 Методы защиты

3.1 Внедрение сервера безопасности

Сервер безопасности (СБ) [5], или прикладной посредник, — сервер, обеспечивающий связь между презентационным слоем и БЛ и выполняющий проверку поступающих в БЛ данных по методам белых или черных списков. Сервер безопасности — это ключевой элемент модернизации архитектуры ИС в данной работе.

В работе [6] приведен пример безопасной архитектуры, где безопасность обеспечивается запретами взаимодействий множества рисковых хостов и множества хостов с цennыми ресурсами. Такое определение безопасности позволило доказать безопасность задач, строящихся на допустимых взаимодействиях, и безопасность информационных технологий.

В случае если презентационный слой будет скомпрометирован (см. рис. 5), то возможна атака на БЛ. В этой связи разумно внедрить некий посредник (СБ) между презентационным слоем и БЛ. Цель внедрения СБ — нейтрализация атак со стороны захваченного или некорректно работающего презентационного слоя.

Сервер безопасности должен обрабатывать все коммуникации с БЛ без исключений (рис. 6).

Для защиты от вредоносных воздействий, которые могут содержаться в легальных сообщениях, необходимо в задачу СБ включить интерпретацию языка общения клиента с БЛ. Наличие корректно работающих языковых проверок должно обеспечить безопасность БЛ от атак с захваченного презентационного слоя.

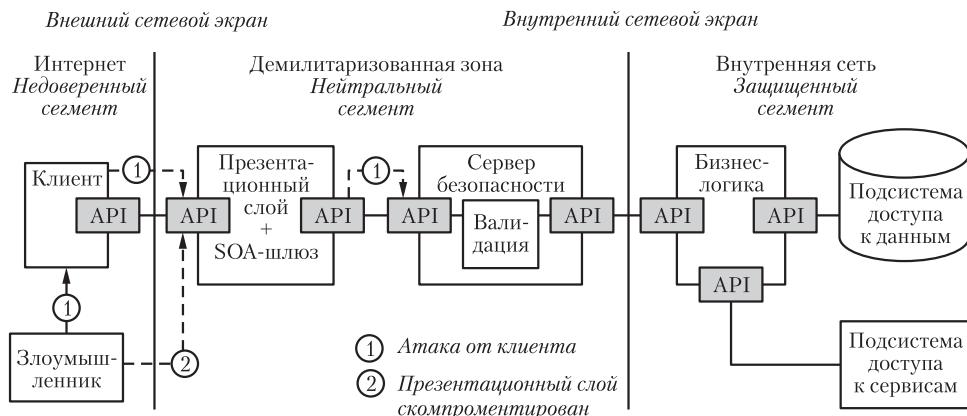


Рис. 6 Шллоз прикладного уровня

Интерпретация языка на СБ означает, что СБ проверяет допустимость сообщения клиента для отправки в БЛ.

Поскольку в контексте данной статьи рассматривается электронный бизнес, у которого клиент может быть размещен в любой точке Интернета, а вся необходимая информация находится у предприятия, то сообщения, поступающие в ИС, являются односторонними, т. е. сообщения исходят от клиента, а не от предприятия.

Также предполагается, что между клиентами и предприятием заключен договор. Это означает, что предприятие заранее знает, какие запросы будет получать от клиентов в рамках заключенного договора. Следовательно, клиенту известен язык общения с ИС, т. е. структура и формат данных, и известен отправитель.

3.2 Обеспечение защиты сервера безопасности

Предполагается, что СБ оснащен однонаправленным каналом для коммуникаций с презентационным слоем, однонаправленным каналом для передачи сообщений клиента в БЛ и безопасным интерфейсом электропитания и управления со стороны ИС. Следовательно, на СБ можно воздействовать следующими путями:

- вредоносное воздействие через трафик (возможно организовать сбой);
- электрическая схема или управление;
- совместно.

Логика атаки на СБ со стороны захваченного презентационного слоя следующая. За вредоносным воздействием, инициированным клиентскими сооб-

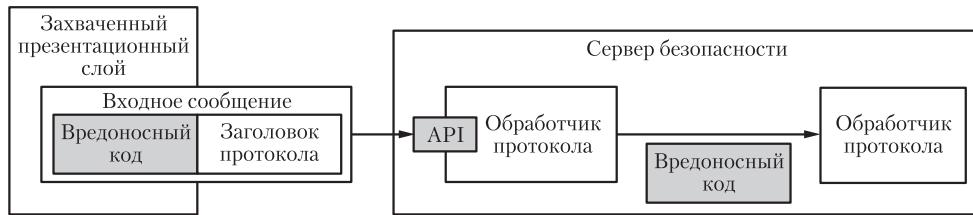


Рис. 7 Вредоносное воздействие на СБ

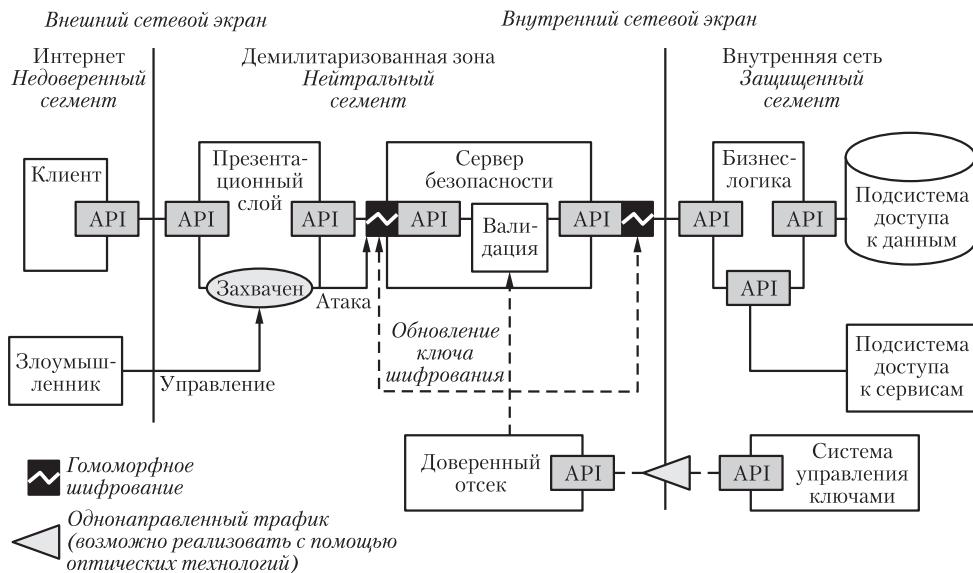


Рис. 8 Использование гомоморфного шифрования

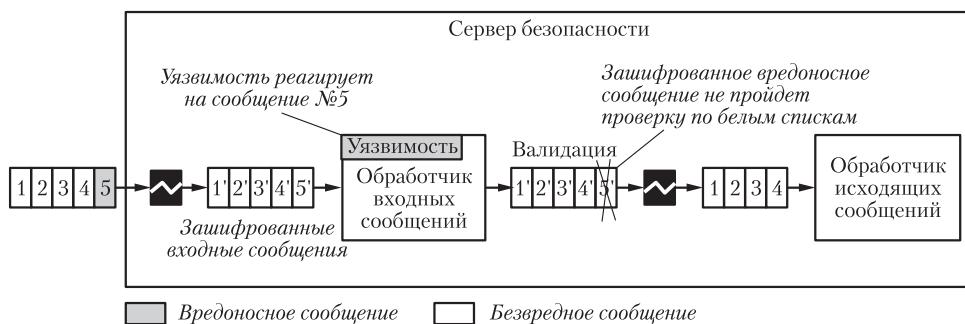


Рис. 9 Схема проверки по белым спискам с использованием гомоморфного шифрования

щениями, на СБ возникает уязвимость, за появлением уязвимости появляется возможность захвата СБ, а это является угрозой БЛ.

Для обеспечения безопасной работы сервера необходимо удостовериться, что вредоносное воздействие (например, переполнение буфера), не может возникнуть, что сбой в электрической сети не может оказать влияния на сервер и т. д. Результатом данных проверок должно быть подтверждение, что СБ не допускает проникновения ВК. Сам протокол одностороннего канала примитивен и проверен, и он не может служить передатчиком ВК, но передаваемое в протоколе содержимое может оказать вредоносное воздействие на СБ.

Теоретически атакующий может сконструировать такое сообщение, которое содержит ВК или может вызвать сбой в программном обеспечении СБ (рис. 7). В конечном итоге СБ будет захвачен.

Чтобы избежать таких атак на СБ, можно применить гомоморфное шифрование [7]. Основная идея защиты состоит в том, что валидация сообщений клиента проводится под шифром, что не позволяет инициировать вредоносное воздействие на программно-аппаратную часть СБ. В таком случае архитектура будет выглядеть немного иначе (рис. 8).

При использовании гомоморфного шифрования коммуникация захваченного презентационного слоя и СБ будет выглядеть следующим образом (рис. 9).

Как видно из рис. 9, зашифрованное вредоносное сообщение не может воздействовать на обработчик входящих сообщений и тем самым не может вызвать сбой СБ. Поскольку проверки на СБ проводятся по сигнатурам ВК или по допустимым словам языка общения клиента и БЛ, то здесь принята следующая терминология.

Метод черных списков [4], или сканирование содержимого, т. е. поиск известного ВК, который, очевидно, должен быть заблокирован (вирус, червь, шпионское программное обеспечение, трояны, вредоносные части кода и т. д.). После завершения сканирования и удаления ВК оставшаяся часть содержимого разрешена к передаче (рис. 10).

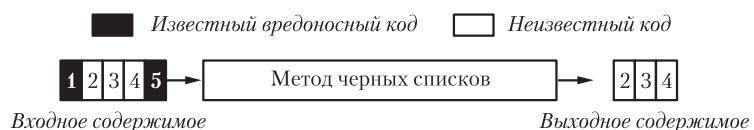


Рис. 10 Метод черных списков

Метод белых списков [4], или валидация содержимого, т. е. поиск известного и заранее определенного содержимого (разрешенный синтаксис и тип данных и т. д.), который разрешен к передаче. В ходе валидации что-либо неизвестное и заранее не определенное должно быть отброшено (рис. 11). И поскольку в приведенной схеме используется гомоморфное шифрование, то проверка вход-



Рис. 11 Метод белых списков

ных сообщений по белым спискам (т. е. валидация) возможна, а следовательно, зашифрованное вредоносное сообщение будет отброшено.

Сервер безопасности проверяет язык. В случае если произошел какой-либо программный сбой, СБ не должен пропускать никакие сообщения, пока после его восстановления не будет произведена проверка целостности языка (рис. 12).

Для обеспечения контроля целостности полей, т. е. пар «атрибут–значение», используем методы, разработанные для контроля целостности СУБД [8], которые основаны на фиксированных схемах. Если СБ получил слова из другого языка, то он обязан отбросить данное сообщение. Если получил слова из нужного языка, то СБ обязан выполнить его проверку.

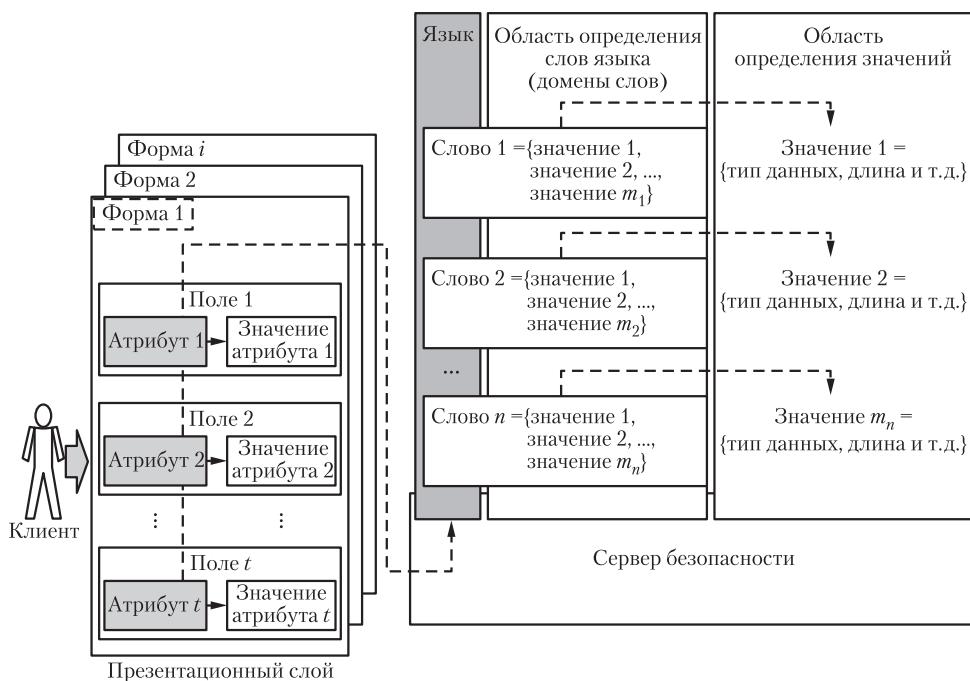


Рис. 12 Проверка языка на СБ в поступающих формах

3.3 Доказательство безопасности интерфейса взаимодействия

- Поскольку число слов в языке конечно, то идентификация каждого правильного слова возможна. Следовательно, если для любого слова языка известно правило проверки, то интерфейс взаимодействия является безопасным.
- Каждое слово безопасно, потому что известна правильная реакция на обработку слова. Значит, интерфейс взаимодействия на уровне этих слов безопасен.

По мере развития потребностей клиентов может появиться необходимость отправлять на предприятие другие файлы (сканированные документы и т. д.) на обработку или хранение. В таком случае разумно создать выделенное хранилище и помещать файлы в него, а не отправлять в БЛ, поскольку файлы невозможно проверить на языковые выражения на СБ.

Описание защищенности данного хранилища не является предметом данной работы, поскольку модель не предполагает, что предприятие будет принимать какие-либо файлы от клиента. Но для наглядности архитектура решения приведена на рис. 13.

В случае если слов в языке много, можно отказаться от проверок входного текста на правильность каждого слова. Можно выделить наиболее вероятные тексты и проверять их на правильность языковой формы. Все, что туда не попадает, направляется в Honeypot, и оцениваются ошибки. В результате

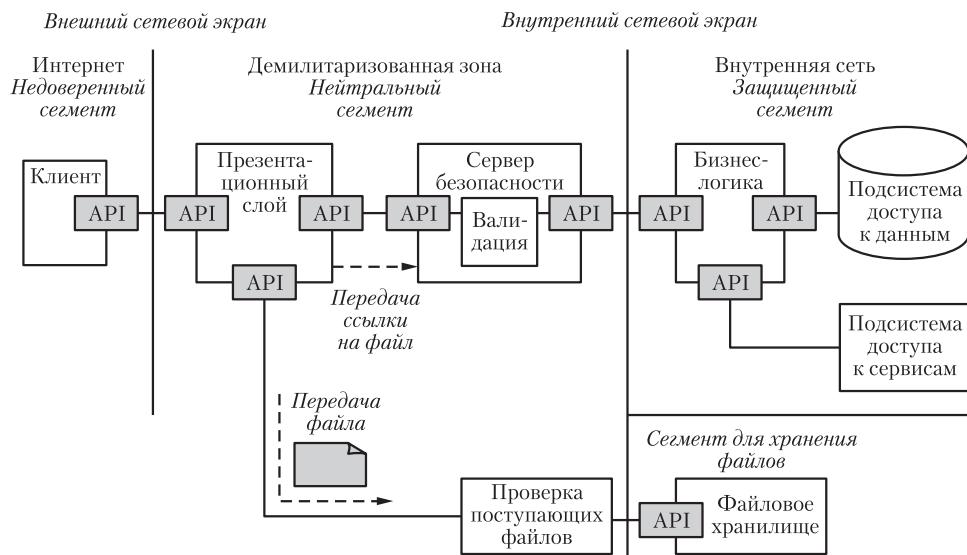


Рис. 13 Обработка файлов

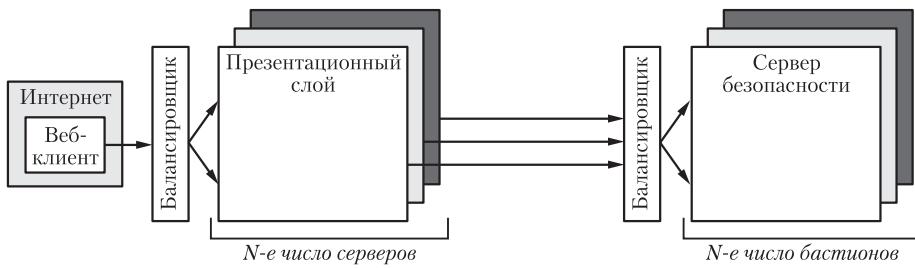


Рис. 14 Балансировка нагрузки на СБ

работы Honeypot дается заключение, допустимо или недопустимо поступающее выражение. Это увеличивает время обработки, но такие проверки требуются редко.

Входной поток, попадающий на СБ, в основном зависит от числа пользователей ИС. Программный код на СБ должен быть описан таким образом, чтобы СБ можно было горизонтально масштабировать, тем самым увеличивая пропускную способность ИС (рис. 14).

4 Заключение

Разработана архитектура ИС, в составе которой присутствует выделенный компонент — СБ, выполняющий проверку языка, тем самым обеспечивая безопасное взаимодействие презентационного слоя с БЛ. Проверка на СБ каждого поступающего в БЛ выражения требует определенных вычислительных мощностей. В этой связи для обеспечения проверки каждого слова в выражениях необходимо, чтобы язык содержал как можно меньше слов, т. е. был бедным.

С появлением СБ ДМЗ стала своего рода экраном прикладного уровня, т. е. работающим и проверяющим входные сообщения на 7-м уровне модели OSI.

В случае реализованной атаки на данные и БЛ предприятия само предприятие может прекратить свое существование. В этой связи разумно, при наличии ресурсов, обеспечивать защиту БЛ своими силами, а не «покупать» готовые программные или аппаратные продукты и решения на рынке, так как они содержат закрытый код.

Стоит отметить, что СБ является неотъемлемой частью ИС. Это означает, что СБ попадает в жизненный цикл управления программным обеспечением (обновления, поддержка, разработка и т. д.), как и все остальные компоненты ИС.

Бизнес-логика исполняет транзакции, получая команды от клиента ИС. Для того чтобы заявитель мог быть воспринят ИС как клиент, он должен пройти процедуру аутентификации. В случае если схемы, алгоритмы, протоколы аутентификации имеют какие-либо уязвимости или слабые места, злоумышленник сможет атаковать ИС через канал, отвечающий за прохождение аутентификации.

В наше время намечается тенденция к унификации рабочего места, т. е. обеспечению доступности одних и тех же ИС и данных с различных рабочих мест сотрудника — персонального компьютера, планшета и телефона. Поскольку мобильные устройства, используемые сотрудниками для решения производственных задач, приносят новые риски, разумно рассмотреть возникающие здесь проблемы информационной безопасности.

Литература

1. ISO / IEC / IEEE 42010:2011. Systems and software engineering — architecture description. <http://cabibbo.dia.uniroma3.it/asw/altrui/iso-iec-ieee-42010-2011.pdf>.
2. Application Server Security Guide 10g. https://docs.oracle.com/cd/B14099_19/core.1012/b13999/rectop.htm.
3. Bhushan B., Khoury C. DataPower Common Use Cases. — IBM US, 2013. https://www.ibm.com/developerworks/community/files/basic/anonymous/api/library/cfa136f0-30c1-4177-9901-62c05d900c5f/document/b6a0dd24-f7ac-4f29-8fff-0b9413cfb4da/media/Impact2013_TSI-3089%20-%20DataPower%20Common%20Use%20Cases.pdf.
4. Rivlin A., Csapo T., Dimitrova D., Mihaylov D. SAP Enterprise Portal and SAP Fiori: Common architecture and recommendations, May 2015. <http://a248.g.akamai.net/n/248/420835/e31e96ee7bd4894bbfb39d92d930463141dfb15172dc955b62d1bde2affde8e1/sapasset.download.akamai.com/420835/sapcom/docs/2015/07/dadd2aec-597c-0010-82c7-eda71af511fa.pdf>.
5. Schneier B. Schneier-Ranum face-off on whitelisting and blacklisting. 2011. https://www.schneier.com/essays/archives/2011/01/schneier-ranum_face-.html.
6. Гришо А., Гришо Н., Тимонина Е., Шоргин С. Безопасные архитектуры распределенных систем // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 3. С. 18–31.
7. Варновский Н. П., Шокуров А. В. Гомоморфное шифрование // Труды Института системного программирования РАН, 2007. Т. 12. С. 27–36.
8. Пушников А. Ю. Введение в системы управления базами данных. Ч. 1. Реляционная модель данных. Гл. 9. Транзакции и целостность баз данных. — Уфа: Изд-во Башкирского ун-та, 1999. 108 с.

Поступила в редакцию 03.08.16

PROTECTION OF BUSINESS LOGIC AGAINST ZERO DAY ATTACKS

A. A. Grusho¹ and D. V. Smirnov²

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

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

Abstract: The paper is devoted to creation of architecture of an information system steady against zero day attacks from the Internet. Justification of security of an information system from zero day attacks is found and the description of conditions under which the required security is provided is given. The architecture of information systems of commercial producers regarding resistance to zero day attacks is analyzed, the model of threats to information systems available in the Internet is described, and the methods of realization of protection of information systems against zero day attacks are developed.

Keywords: information security; zero day attacks; business logic; white lists; black lists; secure architecture; security server

DOI: 10.14357/08696527160304

Acknowledgments

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

References

1. ISO / IEC / IEEE 42010:2011. Systems and software engineering — architecture description. Available at: <http://cabibbo.dia.uniroma3.it/asw/altrui/iso-iec-ieee-42010-2011.pdf> (accessed August 25, 2016).
2. Application Server Security Guide 10g. Available at: https://docs.oracle.com/cd/B14099_19/core.1012/b13999/rectop.htm (accessed August 25, 2016).
3. Bhushan, B., and C. Khoury. 2013. DataPower Common Use Cases. Available at: https://www.ibm.com/developerworks/community/files/basic/anonymous/api/library/cfa136f0-30c1-4177-9901-62c05d900c5f/document/b6a0dd24-f7ac-4f29-8fff-0b9413cfb4da/media/Impact2013_TSI-3089%20-%20DataPower%20Common%20Use%20Cases.pdf (accessed August 25, 2016).
4. Rivlin, A., T. Csapo, D. Dimitrova, and D. Mihaylov. 2015. SAP Enterprise Portal and SAP Fiori: Common architecture and recommendations. Available at: <http://a248.g.akamai.net/n/248/420835/e31e96ee7bd4894bbfb39d92d930463141dfb15172dc955b62d1bde2affde8e1/sapasset.download.akamai.com/420835/sapcom/docs/2015/07/dadd2aec-597c-0010-82c7-eda71af511fa.pdf> (accessed August 25, 2016).

5. Schneier, B. 2011. Schneier–Ranum face-off on whitelisting and blacklisting. Available at: https://www.schneier.com/essays/archives/2011/01/schneier-ranum_face.html (accessed August 25, 2016).
6. Grusho, A., N. Grusho, E. Timonina, and S. Shorgin. 2014. Bezopasnye arkhitektury raspredelennykh sistem [Secure architecture of the distributed systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(3):18–31.
7. Varnovsky, N. P., and A. V. Shokurov. 2007. Gomomorfnoe shifrovaniye [Homomorphic enciphering]. *Trudy Instituta Sistemnogo Programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences] 12:27–36.
8. Pushnikov, A. Yu. 1999. *Vvedenie v sistemy upravleniya bazami dannykh. Chast' 1. Relyatsionnaya model' dannykh. Glava 9. Tranzaktsii i tselostnost' baz dannykh* [Introduction to database management systems. Part 1. Relational model of data. Ch. 9. Transactions and integrity of databases]. Ufa: Bashkir University. 108 p.

Received August 3, 2016

Contributors

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

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

АРХИТЕКТУРНЫЕ УЯЗВИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ*

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

Аннотация: Работа посвящена анализу архитектурных уязвимостей (АУ) распределенных информационно-вычислительных систем (РИВС). Архитектурной уязвимостью в РИВС называется уязвимость, которая не может быть закрыта существующим набором механизмов информационной безопасности (ИБ) или для которой неизвестны способы ее закрытия. Примеры АУ показывают, что обычно эти уязвимости связаны с недопустимыми или упущенными из внимания взаимодействиями в РИВС. Для закрытия или частичного закрытия АУ осуществляется построение специальной архитектуры, не допускающей непосредственно запрещенные взаимодействия. С этой целью можно использовать методы ограничения влияния компонентов РИВС друг на друга.

Ключевые слова: уязвимости распределенных информационно-вычислительных систем; архитектурные уязвимости; методы анализа архитектурных уязвимостей

DOI: 10.14357/08696527160305

1 Введение

Задача поиска уязвимостей в РИВС имеет длинную историю. Наиболее значимым событием в этой истории стало появление американского стандарта TCSEC (Trusted Computer System Evaluation Criteria) («Оранжевая книга») [1] и других книг «Радужной серии». Современные технологии значительно расширили спектр направлений поиска уязвимостей в РИВС (см., например, [2]).

В настоящее время основные исследования по поиску уязвимостей ведутся в сетях, программных системах и микропроцессорах [3].

Основное внимание в статье уделено проблемам ИБ, порожденным архитектурой РИВС. Сформулируем кратко одну из проблем в этой области. Информационные взаимодействия в РИВС определяются бизнес-процессами (БП),

* Работа поддержана 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 Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sshorgin@ipiran.ru

а реализация этих взаимодействий происходит между хостами сети или между программами внутри компьютерной системы. В сетях механизмы ИБ взаимодействий сосредоточены на уровне хостов, а политики безопасности (ПБ) формируются на уровне БП. Отсюда возникают так называемые архитектурные уязвимости. Архитектурной уязвимостью в РИВС называется уязвимость, которая не может быть закрыта существующим набором механизмов ИБ или для которой неизвестны способы ее закрытия. Термин «архитектурный» используется в связи с тем, что эти уязвимости порождаются недопустимыми взаимодействиями, которые исследуются в тематике безопасных архитектур [4, 5].

Закрытие АУ, как правило, требует формирования специальной архитектуры РИВС. Например, существует нормативное требование гальванической развязки секретных и несекретных локальных сетей.

Трудности борьбы с АУ подтверждают тот факт, что эксплойты, основанные на АУ, являются наиболее долгоживущими эксплойтами.

По-видимому, нельзя говорить о полноте выявленных АУ в РИВС, поэтому в статье приводятся примеры, отражающие глубину анализа АУ и защиты от АУ.

2 Примеры архитектурных уязвимостей распределенных информационно-вычислительных систем

2.1 Архитектурные уязвимости в реализациях многоуровневых политик безопасности

Пусть РИВС состоит из аналитического центра High и подсистемы поиска в Интернете исходной для анализа информации и последующей ее передачи в High. Эту подсистему будем называть Low. Информация в High является конфиденциальной, т. е. она должна быть защищена от попадания в подсистему Low и Интернет. Реально используется классическая многоуровневая политика (MLS — multilevel security) [6]. Согласно этой ПБ допустимы любые информационные потоки от Low к High и запрещены информационные потоки от High к Low. В High решаются конкретные аналитические задачи, основанные на данных из баз данных High и данных, полученных от Low из Интернета.

Для сбора данных в Интернете необходимо создать задание (нельзя собирать все). Согласно этому заданию (даже безопасно переданному от High к Low) можно определить задачи, интересные для High. Например, защищенный аналитический центр силового ведомства начал сбор информации о деятельности фирмы *X*. Тогда получившие эту информацию брокеры на рынке ценных бумаг (их можно отнести к уровню Low) начнут сбрасывать акции фирмы *X*. Цены акций фирмы *X* упадут, и фирме будет нанесен материальный ущерб.

Рассмотрим, как информация об интересе к фирме *X* силового ведомства попадает к брокерам. Здесь существует много путей, например присутствие программно-аппаратных агентов на сайтах, содержащих собираемую информацию, попадает к брокерам через посредников — владельцев таких агентов.

Контроль сетевого оборудования позволяет дублировать определенные виды трафика и продавать информацию об интересах силового ведомства. В конце концов, на уровне Low осуществляется взаимодействие с Интернетом и возможны атаки на программно-аппаратную систему Low.

Рассмотренный пример показывает, что MLS не может обеспечить безопасность конфиденциальной информации на уровне High в силу заложенной в эту схему АУ. Даже если предположить, что High и Low создают для сбора информации свою ботнет, обоснование защищенности такой системы остается проблематичным.

2.2 SIEM и другие центры интеллектуального анализа информационной безопасности

В последние годы для анализа ИБ и событий безопасности привлекаются системы интеллектуальной обработки данных, например SIEM (Secure Information and Event Management) [7].

В построении большинства подобных систем можно увидеть АУ. Дело в том, что для обеспечения безопасности интеллектуальной обработки данных создается изолированная информационная система (ИС), которая связана с исходной ИС каналами связи. По этим каналам передается информация о событиях безопасности, происходящих в ИС, и обратно в ИС передаются управляющие воздействия на механизмы безопасности. Архитектурные уязвимости такой системы связаны с тем, что вредоносный код находится в ИС и потенциально может воздействовать на передачу информации от сенсоров событий безопасности. Криптография здесь не может повысить безопасность, так как вредоносный код может контролировать криптографические алгоритмы либо входные данные для этих алгоритмов. Управление механизмами безопасности также может быть скорректировано вредоносным кодом, находящимся в системе.

Если в систему интеллектуального анализа данных включить саму ИС (т. е. не изолировать систему интеллектуального анализа), то вредоносный код может захватить интеллектуальную систему и скомпрометировать ее функционирование.

Таким образом, можно усложнить работу вредоносного кода, но исключить эту АУ в рамках данной архитектуры невозможно.

2.3 Архитектурные уязвимости, основанные на наблюдении редких событий

Как отмечается в работе [8], во многих облачных системах, которые используют свободные вычислительные ресурсы независимых владельцев, выявлено, что очистка ресурсов производится некачественно, т. е. в памяти остаются фрагменты информационной деятельности предыдущих пользователей. Среди этих фрагментов может присутствовать ценная информация. Если злоумышленник на регулярной основе обращается за предоставлением ресурсов и каждый раз

сканирует остаточные следы информации в предоставленных ресурсах, то он может получить ценную информацию.

Пусть вероятность того, что на данном шаге злоумышленник получит доступ к фрагменту ценной информации, равняется p . Естественно, p является малой величиной, однако вероятность того, что в течение n шагов злоумышленник может получить доступ к этой ценной информации, равна $1 - (1 - p)^n$. Тогда если число шагов имеет порядок $1/p$, то вероятность успеха такой атаки становится уже значимой: $1 - e^{-1} \approx 2/3$.

К сожалению, данный пример является не единственным примером АУ, порожденной с помощью редких событий в РИВС. При интенсивной эксплуатации ПБ малые вероятности нарушения ИБ часто становятся большими вероятностями, если противник имеет возможность постоянного наблюдения за целью его атаки.

2.4 Архитектурные уязвимости, возникающие при переконфигурации настроек программно-аппаратных систем

В работе [9] приведен пример, когда нарушение последовательности действий при переконфигурации связного оборудования РИВС приводит к изменениям реально действующей в системе ПБ. Вместе с тем команды переконфигурации передаются по той же сети, по которой передаются данные других процессов, выполняемых в РИВС. Известно, что при этом возможны следующие ошибки в порядке передачи данных:

- задержка пакетов;
- изменение порядка следования пакетов;
- потеря пакетов;
- «маскарад».

Таким образом, изменение порядка команд переконфигурации является весьма вероятным при управлении переконфигурацией через сеть.

Данная уязвимость является архитектурной, так как правильность переконфигурации РИВС определяется работой независимой от управления переконфигурацией сетевой подсистемы.

Эта АУ особенно актуальна для РИВС, которая управляется с помощью SDN (Software-Defined Network), так как в работе [10] показано, что нарушение хотя бы одного правила ПБ может приводить к серьезной переконфигурации всей сети.

2.5 Скрытые каналы

В работе [11] канал назывался скрытым, если он не проектировался, не предполагался для передачи информации в электронной системе обработки данных.

Доказано [12], что скрытые каналы могут быть абсолютно «невидимыми», преодолевать межсетевые экраны и прокси-серверы, преодолевать криптографи-

ческие средства защиты, обладают большой пропускной способностью и возможно построение транзитных путей при организации скрытой передачи данных по скрытым каналам в РИВС.

В работе [3] показано, что с использованием стандарта IEEE 1149 на кремниевых микропроцессорах многих производителей формируются агенты, которые могут нарушать ИБ при использовании этих микропроцессоров. Однако эффективность таких агентов определяется наличием взаимосвязей между ними с помощью скрытых каналов. Гарантий защищенности от скрытых каналов в литературе не выявлено, поэтому этот класс уязвимостей также является классом АУ.

2.6 Обращение к общим ресурсам

Можно сказать, что рассинхронизация данных при обращении к общим ресурсам — это классическая АУ. Она состоит в том, что два пользователя обращаются к общим ресурсам по очереди, причем один производит изменение данных в этом ресурсе. Тогда второй получает этот ресурс и, используя его в вычислительном процессе, опирается на два различных значения этого ресурса. При этом возможно искажение результата вычислительного процесса. Несмотря на то что предложено много механизмов предотвращения таких искажений, исключить основную схему рассинхронизации полностью не удается.

3 Методы анализа архитектурных уязвимостей

Как видно из представленных примеров АУ, в описаниях этих уязвимостей всегда возникают недопустимые или неправильно организованные информационные потоки. Поэтому в качестве исходных данных анализа АУ необходимо создать максимально полный перечень информационных потоков или взаимодействий в РИВС. При этом надо рассматривать все взаимодействия компонентов в РИВС и порождаемых ими информационных потоков. Как было предложено в работе [4], на следующем шаге необходимо провести классификацию допустимых и недопустимых взаимодействий с точки зрения ИБ.

Часто в интересах бизнес-логики допускается присутствие недопустимых взаимодействий компонентов в РИВС, т. е. требования бизнес-логики могут порождать АУ.

В работах [4, 5, 13] для закрытия или частичного закрытия АУ осуществляется построение специальной архитектуры, не допускающей непосредственно запрещенные взаимодействия. С этой целью можно использовать методы ограничения влияний компонентов РИВС друг на друга [14].

4 Заключение

При построении ИБ РИВС часто говорят о принятии рисков. Риски принимаются, когда потери от инцидентов безопасности невелики, или построение защиты требует больших материальных затрат, или когда непонятно, как за-

крывать имеющиеся уязвимости. Введенное в статье понятие АУ относится к последним двум ситуациям.

Примеры АУ, приведенные в статье, показывают, что обычно эти уязвимости связаны с недопустимыми или упущенными из внимания взаимодействиями в РИВС. Структура взаимосвязей компонентов в РИВС достаточно сложна. Хотя передача информации осуществляется через ограниченный набор сетевых устройств или внутри компьютерных интерфейсов, построение на их основе взаимодействий сложных компонентов предполагает анализ цепочек простых взаимодействий и учет наличия других процессов.

С учетом вышесказанного возникает вопрос о том, что такую защищенность в РИВС и как ее оценивать с учетом реализаций различных вычислительных процессов на одних физических системах. Этот вопрос требует отдельного исследования.

Литература

1. Department of Defense Trusted Computer System Evaluation Criteria. — U.S. National Institute of Standards and Technology, Department of Defense, 1985. <http://csrc.nist.gov/publications/history/dod85.pdf>.
2. Detection of intrusions and malware, and vulnerability assessment / Eds. K. Rieck, P. Stewin, J.-P. Seifert. — Lecture notes in computer science ser. — Springer, 2013. Vol. 7967. 219 p.
3. Skorobogatov S., Woods C. Breakthrough silicon scanning discovers backdoor in military chip // Cryptographic hardware and embedded systems / Eds. E. Prouff, P. Schaumont. — Lecture notes in computer science ser. — Heidelberg: Springer, 2012. Vol. 7428. P. 23–40.
4. Грушо А., Грушо Н., Тимонина Е., Шоргин С. Безопасные архитектуры распределенных систем // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 3. С. 18–31.
5. Грушо А., Грушо Н., Тимонина Е., Шоргин С. Возможности построения безопасной архитектуры для динамически изменяющейся информационной системы // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 78–93.
6. Грушо А., Применко Э., Тимонина Е. Теоретические основы компьютерной безопасности. — М.: Академия, 2009. 272 с.
7. CS: Prelude SIEM (July 2012). <http://www.prelude-technologies.com>.
8. Nappa A., Rafique M. Z., Caballero J. Driving in the cloud: An analysis of drive-by download operations and abuse reporting // Detection of intrusions and malware, and vulnerability assessment / Eds. K. Rieck, P. Stewin, J.-P. Seifert. — Lecture notes in computer science ser. — Springer, 2013. Vol. 7967. P. 1–20.
9. Majumdar R., Tetali S. D., Wang Z. Kuai: A model checker for software-defined networks // 2014 Formal Methods in Computer-Aided Design (FMCAD 2014) Proceedings. — Lausanne, Switzerland: IEEE, 2014. P. 163–170.
10. Luo Sh., Wu J., Li J., Guo L. Context-aware traffic forwarding service for application in SDN // 2015 IEEE Conference (International) on Sustainable Computing and Communications (SustainCom 2015) Proceedings. — Chendu, China: IEEE, 2015. P. 557–561.

11. Lampson B. W. A note of the confinement problem // Commun. ACM, 1973. Vol. 16. No. 10. P. 613–615.
12. Грушио А., Грушио Н., Тимонина Е. Анализ меток в скрытых каналах // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 4. С. 12–16.
13. Грушио А., Смирнов Д. Защита бизнес-логики от атак нулевого дня // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 60–73.
14. Грушио А., Грушио Н., Забежайло М., Тимонина Е. Интеграция статистических и детерминистских методов анализа информационной безопасности // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 19–25.

Поступила в редакцию 15.08.16

ARCHITECTURAL VULNERABILITIES OF DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS

A. A. Grusho, N. A. Grusho, E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin

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

Abstract: The paper is devoted to the analysis of architectural vulnerabilities of the distributed information systems. Such vulnerability, which cannot be closed by the existing set of mechanisms of information security or for which ways of its closing are unknown, is called an architectural vulnerability in the distributed information systems. The examples of architectural vulnerabilities show that usually, these vulnerabilities are connected with the inadmissible or missed from attention interactions in distributed information systems. For closing or partial closing of architectural vulnerabilities, a special architecture which does not allow directly forbidden interactions was created. For this purpose, it is possible to use methods of restriction of influences of some components of distributed information systems on other components.

Keywords: vulnerabilities of distributed information systems; architectural vulnerabilities; methods of architectural vulnerabilities analysis

DOI: 10.14357/08696527160305

Acknowledgments

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

References

1. Department of Defense Trusted Computer System Evaluation Criteria. 1985. DoD. Available at: <http://csrc.nist.gov/publications/history/dod85.pdf> (accessed September 19, 2016).

2. Rieck, K., P. Stewin, and J.-P. Seifert, eds. 2013. *Detection of intrusions and malware, and vulnerability assessment*. Lecture notes in computer science ser. Springer. Vol. 7967. 219 p. Available at: <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-39235-1> (accessed September 19, 2016).
3. Skorobogatov, S., and C. Woods. 2012. Breakthrough silicon scanning discovers backdoor in military chip. *Cryptographic hardware and embedded systems*. Eds. E. Prouff and P. Schaumont. Lecture notes in computer science ser. Heidelberg: Springer. Vol. 7428. 23–40. Available at: http://www.cl.cam.ac.uk/~sps32/Silicon_scan_draft.pdf (accessed September 19, 2016).
4. Grusho, A., N. Grusho, E. Timonina, and S. Shorgin. 2014. Bezopasnye arkhitektury raspredelennykh sistem [Secure architecture of the distributed systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(3):18–31.
5. Grusho, A., N. Grusho, E. Timonina, and S. Shorgin. 2015. Vozmozhnosti postroeniya bezopasnoy arkhitektury dlya dinamicheski izmenayushcheysha informatsionnoy sistemy [Possibilities of secure architecture creation for dynamically changing information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):78–93.
6. Grusho, A., Ed. Primenko, and E. Timonina. 2009. *Teoreticheskie osnovy kompyuternoy bezopasnosti* [Theoretical bases of computer security]. Moscow: Academy. 272 p.
7. CS: Prelude SIEM. 2012. Available at: <http://www.prelude-technologies.co> (accessed September 19, 2016).
8. Nappa, A., M. Z. Rafuque, and J. Caballero. 2013. Driving in the cloud: An analysis of drive-by download operations and abuse reporting. *Detection of intrusions and malware, and vulnerability assessment*. Eds. K. Rieck, P. Stewin, and J.-P. Seifert. Lecture notes in computer science ser. Springer. 7967:1–20. Available at: http://software.imdea.org/~juanca/papers/cloud_dimva13.pdf (accessed September 19, 2016).
9. Majumdar, R., S. D. Tetali, and Z. Wang. 2014. Kuai: A model checker for software-defined networks. *2014 Formal Methods in Computer-Aided Design (FMCAD 2014) Proceedings*. Lausanne, Switzerland: IEEE. 163–170. Available at: http://www.cs.utexas.edu/users/hunt/FMCAD/FMCAD14/proceedings/27_majumdar.pdf (accessed September 19, 2016).
10. Luo, Sh., J. Wu, J. Li, and L. Guo. 2015. Context-aware traffic forwarding service for application in SDN. *2015 IEEE Conference (International) on Sustainable Computing and Communications (SustainCom 2015) Proceedings*. 2015. Chendu, China: IEEE. 557–561.
11. Lampson, B. W. 1973. A note of the confinement problem. *Commun. ACM* 16(10):613–615.
12. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2014. Analiz metok v skrytykh kanalakh [The analysis of tags in the covert channels]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(4):12–16.
13. Grusho, A., and D. Smirnov. 2016. Zashchita biznes-logiki ot atak nulevogo dnya [Protection of business logic against zero day attacks]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):60–73.

14. Grusho, A., N. Grusho, M. Zabezhailo, and E. Timonina. 2016. Integratsiya statisticheskikh i deterministskikh metodov analiza informatsionnoy bezopasnosti [Integration of statistical and deterministic methods of information security analysis]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(3):19–25.

Received August 15, 2016

Contributors

Grusho Alexander A. (b. 1946) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Head of Laboratory, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences 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 Sciences 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 Sciences 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

БЕЗОПАСНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕД*

А. А. Грушо¹, М. И. Забежайл², А. А. Зацаринный³, В. О. Писковский⁴

Аннотация: Работа посвящена адаптации концепции непротиворечивости и управления транзакциями систем управления базами данных (СУБД) в применении к динамической реконфигурации облачных вычислительных сред (ОВС). Даны определения операций и процедур реконфигурации ОВС. Их отличительная особенность — перевод сети из одного корректного состояния в другое корректное состояние. Представлены аномалии, встречающиеся при работе СУБД, и трактовка их аналогов при процедурах реконфигурации ОВС. Также приведена теорема непротиворечивости для процессов динамической реконфигурации ОВС.

Ключевые слова: облачные вычислительные среды; автоматическая непротиворечивая реконфигурация сети; software-defined network; СУБД; аномалии

DOI: 10.14357/08696527160306

1 Введение

Для традиционных сетей характерны статические настройки маршрутизации потоков, политики доступа и иных компонентов конфигураций. Для ОВС характерна динамическая настройка и применение автоматизированных процедур настройки, например на основе software-defined networks (SDN) — программно-конфигурируемых сетей (ПКС) [1–5].

Динамическая реконфигурация ОВС и управление доступом пользователей к вычислительным ресурсам приводят к необходимости формирования последовательности шагов на всех этапах подготовки и настройки ОВС. Это означает выполнение на каждом этапе настройки и изменения конфигурации ОВС условий, гарантирующих совместимость (непротиворечивость) и целостность сетевых

*Работа поддержана РФФИ (проект 15-29-07981 офи-м).

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

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

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

⁴Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, vprp80@yandex.ru

соединений с точки зрения маршрутизации, политик безопасности и достигнутых соглашений об уровне обслуживания. Аномалия, или нарушение целостности и совместимости объектов, определяющих сетевую конфигурацию ОВС (таблицы маршрутизации, локализация сетевых и вычислительных ресурсов, настройки управления доступом и пр.), является потенциальной уязвимостью и может привести к снижению уровня защиты ОВС вплоть до полной компрометации или прекращению работы сервисов.

Для разработки методики построения непротиворечивой автоматизированной конфигурации ОВС предлагается обобщить и использовать результаты концепции упорядочиваемости (serializability), разработанной для ANSI SQL-92 [6–9].

2 Аномалии реконфигурации SDN

Рассмотрим аномалии в работе СУБД и их аналоги в работе «автоматически» конфигурируемых SDN-сетей.

В случае SDN-сетей аналогом транзакции СУБД выступает процедура реконфигурации, состоящая из нескольких операций по изменению таблиц маршрутизации в коммутаторах. Процедура реконфигурации сети может быть вызвана изменением: состава активного оборудования; состава обслуживаемых тенантов и сетевых служб; политик безопасности; уровней обслуживания потребителей (тенанты, пользователи).

Данным, или строкам реляционных таблиц, применяемым для описания транзакций и аномалий при работе СУБД, в SDN-сетях соответствуют строки в таблицах маршрутизации коммутаторов и их содержимое. В зависимости от вносимых процедурой реконфигурации изменений в коммутаторах может быть затронуто несколько таблиц коммутации, расположенных в нескольких коммутаторах, а также несколько строк в каждой из таблиц и полей в строке коммутации соответственно.

Перечисленные выше объекты процедуры конфигурации сетей не могут быть подвержены мгновенным изменениям. Даже изменение отдельного поля в строке таблицы коммутации занимает время, определяемое аппаратурой и конфигурацией сети. В случае использования нескольких строк, таблиц коммутации и коммутаторов необходимо учитывать время доступа к объекту, время внесения изменений и время отклика о статусе произведенных операций над данными (успешно или нет). Время доступа к коммутаторам также зависит от их реализации (виртуальное устройство или физически отдельный сетевой компонент), расположения в сети, способа соединений (например, in-bound — управление проходит по тем же линиям, что и данные, или out of bound — выделенные линии для связи коммутатора с контроллером), скорости и загруженности соединений коммутатор–контроллер.

Понятно, что соединения виртуальных устройств, физически расположенных на одном сервере, происходят в оперативной памяти компьютера, т. е. за промежуток времени, существенно более короткий, чем при работе устройств,

Аномалии, встречающиеся при работе СУБД, и предлагаемая трактовка их аналогов при групповых операциях реконфигурации ОВС

Аномалия	Описание	
	СУБД [10]	ОВС
1. P0 Dirty Write (непредсказуемый результат записи)	Транзакция изменяет данные. Сторонняя транзакция также меняет эти же данные до «ввода в действие» или «отмены изменений» данных первой транзакцией. Если какая-либо из указанных транзакций отказывается от изменений и возвращает корректные с ее точки зрения данные, то неясно, какие данные считать корректными	Конкурентно не менее двух процедур реконфигурации вносят противоречавшие друг другу изменения в один и тот же сетевой объект x (это могут быть противоречавшие друг другу значения полей или строки таблиц маршрутизации) с отложенным вводом в действие измененных правил коммутации. Если оказывается, что какая-либо из указанных процедур реконфигурации отказывается от изменений и возвращает корректные с ее точки зрения данные полей или содержимое таблиц коммутации, то не определено, останется ли корректным состояние объекта реконфигурации и конфигурация в целом коммутатора, содержащего эти объекты
2. P1 Dirty Read (непредсказуемый результат чтения)	Транзакция читает данные, которые записаны другой транзакцией, но не «введены в действие»	Контроллер(ы) опрашивает(ют) содержимое таблиц коммутации и учитывает(ют) при реконфигурации данные, которые не приобрели или утеряли актуальность по вине стороннего процесса реконфигурации (происходящего в интересах достижения других целей)
3. P4 Lost Update (потерянные данные)	Транзакция читает данные. В это время сторонняя транзакция изменяет эти данные (возможно, с использованием ранее прочитанных значений). Затем первая транзакция (на основе ранее прочитанных значений) меняет данные и «вводит их в действие». Теперь, после ввода в действие данных второй транзакцией, данные с точки зрения второй транзакции утеряны	Контроллер(ы) опрашивает(ют) содержимое таблиц коммутации и учитывает(ют) при реконфигурации данные, которые на момент выполнения самой целевой реконфигурации уже подверглись изменению другими реконфигурационными процессами. В результате получаем некорректно настроенный коммутатор
4. P2 Fuzzy Read (Non-repeatable) (изменение набора ранее прочитанных данных)	Транзакция еще раз пытается прочесть ранее прочитанные данные и находит, что сторонняя транзакция изменила или удалила эти данные	Контроллеры вносят изменения в объект управления. При этом оказывается, что изменения используют данные, которые изменены или удалены конкурирующим процессом реконфигурации

Окончание таблицы на с. 86

Аномалии, встречающиеся при работе СУБД, и предлагаемая трактовка их аналогов при групповых операциях реконфигурации ОВС (окончание)

Аномалия	Описание	
	СУБД [10]	ОВС
5. Р3 Phantom (phantom)	<p>Транзакция еще раз выполняет запрос, который возвращает набор строк, удовлетворяющих условиям отбора, и выясняет, что другая транзакция добавила строки, также удовлетворяющие условиям отбора.</p> <p>Например, транзакция запрашивает количество сотрудников. Через 5 мин этот же запрос возвращает большее значение, так как другой пользователь за это время добавил сотрудника, подпадающего под критерии выбора в запросе. В отличие от Р2, ранее полученные данные не изменились</p>	<p>Контроллеры вносят изменения в объект управления. При этом оказывается, что конкурирующим процессом в таблицы маршрутизации внесены изменения, делающие внесенные изменения недействительными</p>
6. А5А Read Skew (асимметричное чтение)	<p>Пусть данные X и Y находятся в некотором соотношении. Транзакция T_1 читает X. Сторонняя транзакция T_2 меняет X и Y и вводит их в действие. Если сейчас T_1 прочитает Y, то это значение не будет соответствовать ранее прочитанному X и транзакция T_1 вернет нарушение целостности</p>	<p>Объекту реконфигурации X (поле, строка, таблица коммутации, содержимое таблиц коммутатора) соответствует объект реконфигурации Y. Процесс реконфигурации/верификации запрашивает данные объекта X. Конкурирующий процесс реконфигурации меняет X и Y. Если первый процесс запросит содержимое объекта Y, то он найдет его несоответствие ранее прочитанному</p>
7. А5В Write Skew (асимметричная запись)	<p>Пусть данные X и Y находятся в некотором соотношении. Транзакция T_1 читает X и Y и находит их корректными. Сторонняя транзакция T_2 читает X и Y, меняет X и вводит данные в действие. Затем T_1 меняет Y. Таким образом, соотношение между X и Y может быть нарушено</p>	<p>Объекту реконфигурации X (поле, строка, таблица коммутации, содержимое таблиц коммутатора) соответствует объект конфигурации Y. Процесс реконфигурации/верификации запрашивает данные объектов X и Y и находит их корректными. Конкурирующий процесс реконфигурации меняет X. Если первый процесс изменит содержимое объекта Y, то соответствие X и Y будет нарушено</p>

реализованных на физически различных сетевых компонентах, что должно учитываться при анализе таких диаграмм.

Таким образом, построение и анализ временных диаграмм реконфигурации сети — сложная задача.

Пока же упростим анализ групповых операций по реконфигурации сети, опустив из рассмотрения временные задержки между операциями, оставив только их последовательность.

В таблице представлены аномалии, встречающиеся при работе СУБД, и предлагаемая трактовка их аналогов при групповых операциях реконфигурации SDN-сетей.

3 Условия непротиворечивой реконфигурации SDN

Приведенная таблица показывает, что в основе аномалий лежат противоречия, возникающие при реконфигурации сети. Следуя идеологии статей [6] и [10], будем использовать следующие понятия.

Объектами процедуры конфигурации будем считать поле или несколько строк в таблице или таблицах маршрутизации, сами строки в таблицах маршрутизации или таблицы маршрутизации, а также реконфигурируемые коммутаторы или иные сущности, влияющие на конфигурацию сетей, и некоторое множество указанных сущностей.

Граф сети SDN определяется следующим образом:

- вершины графа — сущности сетевой инфраструктуры (хосты, коммутаторы, маршрутизаторы, контроллеры);
- дуги графа — разрешенные информационные потоки непосредственно от одной вершины к другой;
- конфигурация сети — множество разрешенных путей в графе;
- реконфигурация сети — изменения в множестве разрешенных путей в графе.

Реконфигурация сети достигается изменениями в таблицах коммутаций.

Противоречия — искажение графа разрешенных путей, т. е.

- (1) появление разрешения на недопустимый путь;
- (2) запрет на допустимый путь;
- (3) блокирование фрагментов графа.

Проблема состоит в том, что переход от одного непротиворечивого состояния сети к другому непротиворечивому состоянию порождает временные противоречия или конфликты.

Пример противоречия (1) можно найти в работе [11]. Примеры противоречий (2) и (3) можно найти в таблице. Выбор разрешенных путей в графе SDN-сети — это функция контроллера. В данном разделе не рассматриваются алгоритмы поиска путей, поэтому противоречия (1)–(3) считаются не связанными

с нарушениями работы контроллера. В работе рассматриваются противоречия, возникающие при реализации последовательности шагов реконфигурации. Аналоги решения этой задачи были найдены в реализации транзакций СУБД [6].

Любая реконфигурация сводится к выполнению ряда операций над объектами реконфигураций.

Процедура реконфигурации состоит из вектора $P^i = ((O_1^i, e_1^i), \dots, (O_n^i, e_n^i))$ операций и объектов реконфигурации, где O_k^i — операция; e_k^i — объекты реконфигурации k -й операции O_k^i в i -й процедуре. Операция рассматривается как атомарное неделимое понятие.

Чтобы избежать временных противоречий, возникающих при реконфигурации, вводятся операции блокировки (lock) и разблокировки (unlock) объектов. Если объект блокирован в процедуре P , то другие процедуры не могут использовать его в своих операциях, в том числе разблокировать и заново блокировать. Для того чтобы каждая процедура реконфигурации «видела» непротиворечивые состояния сети перед выполнением каждой операции, в каждой выполняющейся процедуре нельзя после разблокировки объекта требовать его новой блокировки. Также если объект заблокирован при выполнении шага i в процедуре P , то другие процедуры не могут выполнять операции блокирования этого объекта начиная с шага i и до шага, когда этот объект будет разблокирован процедурой P . Формальная модель блокировки объекта e в процедуре P следующая [6].

Определение 1. Процедура $P = ((O_1, e_1), \dots, (O_n, e_n))$ заблокировала объект e на шаге i , если выполняются следующие условия:

- (1) $\exists j \leq i : O_j = \text{lock}, e_j = e;$
- (2) не существует $k : j < k < i : O_k = \text{unlock}, e_k = e.$

Определение 2. Процедура $P = ((O_1, e_1), \dots, (O_n, e_n))$ называется правильной, если $\forall i = \overline{1, n}$ выполняются следующие условия:

- (1) если $O_i = \text{lock}$, объект e_i не был заблокирован на предыдущих $i - 1$ шагах;
- (2) если $O_i \neq \text{lock}$, то объект e_i был заблокирован процедурой P до $i - 1$ шага включительно;
- (3) если в процедуре n операций, то $O_n = \text{unlock}$, а единственным заблокированным объектом является e_n .

Расписание реконфигурации S — последовательность операций из множества процедур P^i , $i = \overline{i, k}$.

Расписание не всегда бывает непротиворечивым. Однако если найдется перестановка операций такая, что в расписании S' не будет противоречий, то такое расписание называется правильным. Очевидно, что проведение операций над заблокированным объектом является противоречием. Такая операция может выполняться только после разблокирования объекта.

Расписание реконфигурации S называется допустимым, когда $\forall i = \overline{1, n}$, если объект e блокируется на шаге с номером i , то e не был заблокирован ни одной

процедурой ранее шага i . Это означает, что если другой процедуре P' нужно заблокировать объект e , то ей надо ждать, когда этот объект будет разблокирован процедурой P , заблокировавшей его.

Определение 3. Процедура $P = ((O_1, e_1), \dots, (O_n, e_n))$ называется двухфазной, если для некоторого $j < n$ выполняются следующие условия:

- (1) если $i < j$, то $O_i \neq \text{unlock}$;
- (2) если $i = j$, то $O_i = \text{unlock}$;
- (3) если $i > j$, то $O_i \neq \text{lock}$.

Непротиворечивость реконфигурации требует, чтобы процедуры были двухфазными, т. е. до тех пор, пока все процедуры не стали двухфазными, можно построить допустимое, но противоречивое расписание.

Основные результаты, приведенные в работе [6], сводятся к двум утверждениям.

Утверждение 1. Если все процедуры P^i , $i = \overline{1, k}$, являются правильными и двухфазными, то любое допустимое расписание непротиворечиво.

Утверждение 2. Если процедура P не является правильной и двухфазной, то существует правильная и двухфазная процедура P' такая, что P и P' имеют допустимое, но противоречивое расписание.

4 Заключение

Условия непротиворечивости реконфигурации сети являются достаточными. В частности, двухфазность процедур является очень сильным требованием. Вместе с тем практика показывает, что противник может использовать противоречивые реконфигурации сети для построения атак на ОВС. Противоречия, возникающие при реконфигурации, являются уязвимостями, которые необходимо закрыть.

Построенная в работе аналогия с проблемами, возникающими в СУБД, позволяет утверждать, что существуют методы предотвращения указанных уязвимостей при реконфигурации сети.

Литература

1. Revilak S., O’Neil P., O’Neil E. Precisely serializable snapshot isolation // 27th Conference (International) on Data Engineering Proceedings. — IEEE, 2011. P. 482–493.
2. Reitblatt M., Foster N., Rexford J., Walker D. Consistent updates for software-defined networks: Change you can believe in! // HotNets-X: 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2011. Article No. 7. P. 1–6.

3. *Reitblatt M., Foster N., Rexford J., Schlesinger C., Walker D.* Abstractions for network update // ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2012. P. 323–334.
4. *McGeer R.* A correct, zero-overhead protocol for network updates // 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2013. P. 161–162.
5. *McGeer R.* Declarative verifiable SDI specifications // 37th IEEE Symposium on Security and Privacy Proceedings. — IEEE: 2016. P. 198–203.
6. *Eswaran P., Gray J., Lorie R., Traiger I.* The notions of consistency and predicate locks in a database system // Commun. ACM, 1976. Vol. 19. No. 11. P. 624–633.
7. *Bernstein P. A., Hadzilacos V., Goodman N.* Concurrency control and recovery in database systems. — Reading, MA, US: Addison-Wesley, 1987. 264 p.
8. *O’Neil P.* Database: Principles, programming, performance. — San-Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publ., 1994. 860 p.
9. *Конолли Т., Бегг К., Страчан А.* Базы данных: проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика / Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2001. 1120 с. (*Conolly T. M., Begg C. E.* Database systems. A practical approach to design, implementation, and management. — 2nd ed. — Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1999. 1093 p.)
10. *Berenson H., Bernstein Ph., Gray J., Melton J., O’Neil E., O’Neil P.* A critique of ANSI SQL isolation levels // ACM SIGMOD Conference (International) on Management of Data Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 1995. P. 1–10.
11. *Majumdar R., Tetali S. D., Wang Z.* Kuai: A model checker for software-defined networks // 14th Conference on Formal Methods in Computer-Aided Design Proceedings. — Lausanne, Switzerland: IEEE, 2014. P. 163–170.

Поступила в редакцию 15.08.16

SECURE AUTOMATIC RECONFIGURATION OF CLOUDY COMPUTING

A. A. Grusho, M. I. Zabezhailo, A. A. Zatsarinnyy, and V. O. Piskovski

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

Abstract: The paper is devoted to adaptation of the concept of consistency and management of transactions of data base management systems (DBMS) in application to a dynamic reconfiguration of cloudy computing environments. Definitions of operations and procedures of a reconfiguration of cloudy computing environments are given. Their distinctive feature is to transfer of network from one correct state to another correct state. The anomalies which are found during

the work of DBMS and an interpretation of their analogs at procedures of a reconfiguration of cloudy computing environments are presented. The theorem of consistency for processes of a dynamic reconfiguration of cloudy computing environments is also provided.

Keywords: cloudy computing environments, automatic consistent reconfiguration of network, software-defined network, DBMS, anomaly

DOI: 10.14357/08696527160306

Acknowledgments

The paper was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-29-07981 ofi-m).

References

1. Revilak, S., P. O’Neil, and E. O’Neil. 2011. Precisely serializable snapshot isolation. *27th Conference (International) on Data Engineering Proceedings*. 482–493.
2. Reitblatt, M., N. Foster, J. Rexford, and D. Walker. 2011. Consistent updates for software-defined networks: Change you can believe in! *HotNets-X: 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks Proceedings*. — New York, NY: ACM. 7:1–6.
3. Reitblatt, M., N. Foster, J. Rexford, C. Schlesinger, and D. Walker. 2012. Abstractions for network update. *ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication Proceedings*. 323–334.
4. McGeer, R. 2013. A correct, zero-overhead protocol for network updates. *2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking Proceedings*. 161–162. Available at: <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2013/papers/hotsdn/p161.pdf> (accessed September 19, 2016).
5. McGeer, R. 2016. Declarative verifiable SDI specifications. *IEEE Security and Privacy Workshops*. 198–203. Available at: <http://spw16.langsec.org/papers/mcgeer-verifiable-sdi-specs.pdf> (accessed September 19, 2016).
6. Eswaran, P., J. Gray, R. Lorie, and I. Traiger. 1976. The notions of consistency and predicate locks in a database system. *Commun. ACM* 19(11):624–633.
7. Bernstein, P. A., V. Hadzilacos, and N. Goodman. 1987. *Concurrency control and recovery in database systems*. Reading, MA: Addison-Wesley Publ. 264 p.
8. O’Neil, P. 1994. *Database: Principles, programming, performance*. San-Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publ. 860 p.
9. Conolly, T. M., and C. E. Begg. 1999. *Database systems. A practical approach to design, implementation, and management*. 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley. 1093 p.
10. Berenson, H. Ph. Bernstein, J. Gray, J. Melton, E. O’Neil, and P. O’Neil. 1995. A critique of ANSI SQL isolation levels. *ACM SIGMOD Conference (International) on Management of Data Proceedings*. New York, NY: ACM. 1–10. Available at: <http://www.cs.umb.edu/~poneil/iso.pdf> (accessed September 19, 2016).

11. Majumdar, R., S. D. Tetali, and Z. Wang. 2014. Kuai: A model checker for software-defined networks. *14th Conference on Formal Methods in Computer-Aided Design Proceedings*. Lausanne, Switzerland: IEEE. 163-170. Available at: http://www.cs.utexas.edu/users/hunt/FMCAD/FMCAD14/proceedings/27_majumdar.pdf (accessed September 19, 2016).

Received August 15, 2016

Contributors

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

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

Zatsarinnyy Alexander A. (b. 1951) — Doctor of Science in technology, professor, Deputy Director, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; azatsarinny@ipiran.ru

Piskovski Viktor O. (b. 1963) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; vpvp80@yandex.ru

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВИРТУАЛЬНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОЛЛЕКТИВОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ГРУППОВЫХ РЕШЕНИЙ*

*И. А. Кириков¹, А. В. Колесников², С. Б. Румовская³, А. В. Барзенков⁴,
Е. В. Петренко⁵*

Аннотация: Рассматривается новый класс интеллектуальных информационных систем — виртуальные гетерогенные коллектизы (ВГК) людей (аватар) и виртуальных моделей экспертов. В таких коллективах средства вычислительной техники формируют среду для общения, а аватара в данной работе выступает в роли интерфейса управления реальным экспертом одной из моделей гетерогенного модельного поля (ГМП), а также для замещения модели собой. Представлена концептуальная модель ВГК на языках мелкозернистых функциональных гибридных интеллектуальных систем (МФГиИС) и гибридных интеллектуальных многоагентных систем (ГиИМАС). Исследованы особенности участников ВГК, отношений между ними и наследование ими принципов искусственных гетерогенных коллективов (ИГК) и систем поддержки принятия групповых решений (СППГР).

Ключевые слова: искусственный гетерогенный коллектив; виртуальный гетерогенный коллектив; системы поддержки принятия групповых решений

DOI: 10.14357/08696527160307

1 Введение

Решение задач в системах управления идет в условиях смены научной картины мира [1]. Математика, исследование операций, теория управления и пр., исследуя методы решения в мире искусственно упрощенных, игровых ситуаций выработали широкий спектр терминов и мнений от «простой задачи» до

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты 16-07-00272 А и 16-07-00271 А).

¹Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, baltpir@rambler.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, sophiyabr@gmail.com

⁴Балтийский федеральный университет им. И. Канта, avbarzenkov@mail.ru

⁵Балтийский федеральный университет им. И. Канта, petrenkoe@hotmail.com

«сложной задачи» и «проблемы». Для упорядочения терминологии в [2] введена качественная шкала и мера сложности моделирования задач. Термин «проблема» применяется, когда «у нас есть проблема», а «задача» — когда «необходимо решить задачу» [3]. Измерения по шкале сложности задач (простая–сложная) отнесли проблему ближе к правой границе и перевели ее в сферу коллективного интеллекта. Аналогично высказался и В. Ф. Спиридонов [4], исследуя психологию решения задач и проблем. Простейшая форма организации коллективного интеллекта — распространенные на практике рабочие совещания за круглым столом для выявления противоречий и решения сложных задач (проблем) — это системы «лицо, принимающее решение (ЛПР)–эксперты», работающие на постоянной или временной основе, естественные гетерогенные системы [5, 6]: планерки, консилиумы, селекторные и диспетчерские совещания и т. п. В [5] исследованы различия индивидуального и коллективного интеллекта, представлена «модель принятия коллективных решений в малых группах», а в [7] выявлены эффекты и свойства коллективного принятия решений.

Настоящая работа — продолжение [8], где был предложен новый класс интеллектуальных информационных систем — ВГК — интеллектуальные гетерогенные системы с когнитивной составляющей, моделирующие работу коллективного интеллекта, принимающего решения, в смысле Г. Гарднера, члены которых — как люди (посредством аватар), так и виртуальные эксперты — модели. Рассмотрим особенности ВГК, их элементы и наследование ими принципов ИГК и СППГР.

2 Особенности виртуальных гетерогенных коллективов и их элементов

В [5] предложен метод повышения качества индивидуального принятия решения посредством ИГК — моделей коллективного труда экспертов в малых группах за круглым столом, естественных гетерогенных систем. В [8] этот подход развит для повышения качества и эффективности коллективного принятия решений и с учетом того, что структуре человеческого разума и коллективному интеллекту, как оригиналам, должны соответствовать междисциплинарные подходы. Виртуальные гетерогенные коллективы (рис. 1) — ответ на увеличение темпов развития ИГК и методов организации заочного взаимодействия экспертов, а именно: СППГР, переносимых в неигровые виртуальные миры, и повышение интерактивности интерфейсов систем поддержки принятия решений (СППР) за счет средств когнитивной компьютерной графики. Виртуальные гетерогенные коллективы (см. рис. 1) — комбинация методов организации заочного взаимодействия экспертов и ИГК.

Участники ВГК: (1) виртуальные — модели ГМП ИГК, имитирующие рассуждения экспертов и ЛПР; (2) реальные — посредством аватар экспертов и ЛПР. В [8] аватара коллектива виртуальных экспертов — интеллектуальный объект с собственной базой знаний, когнитивным образом, отображающим

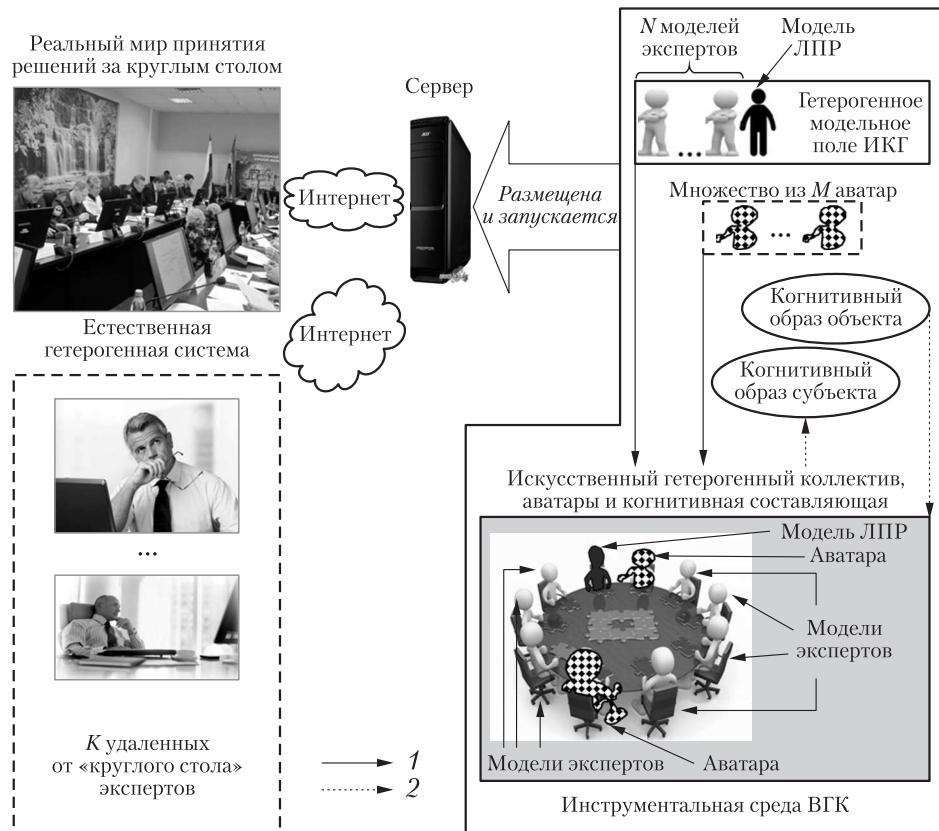


Рис. 1 Виртуальный гетерогенный коллектив: 1 — включение моделей ГМП и аватаров в ВГК; 2 — передача информации от ВГК когнитивному образу субъекта и от когнитивного образа объекта ВГК

процесс принятия решения аватарой, и интерфейсом управления аватарой реальным удаленным экспертом (наблюдателем, контролером и аналитиком). На данном этапе исследований аватара рассматривается как интерфейс управления реальным экспертом одной из моделей ГМП, а также для замещения модели собой.

Для естественной гетерогенной системы (например, коллектива отдела организации) на сервере размещается инструментальная среда ВГК, которая содержит: (1) ГМП, включающее N моделей экспертов и модель LPPr; (2) множество из M аватаров, мощность которого определяется редукцией сложной задачи (рис. 2) совместно с LPPr-руководителем в зависимости от числа подзадач, контролируемых реальными участниками ВГК (N может быть равно M); (3) когнитивный образ объекта — условий решаемой задачи, источник информации для реальных

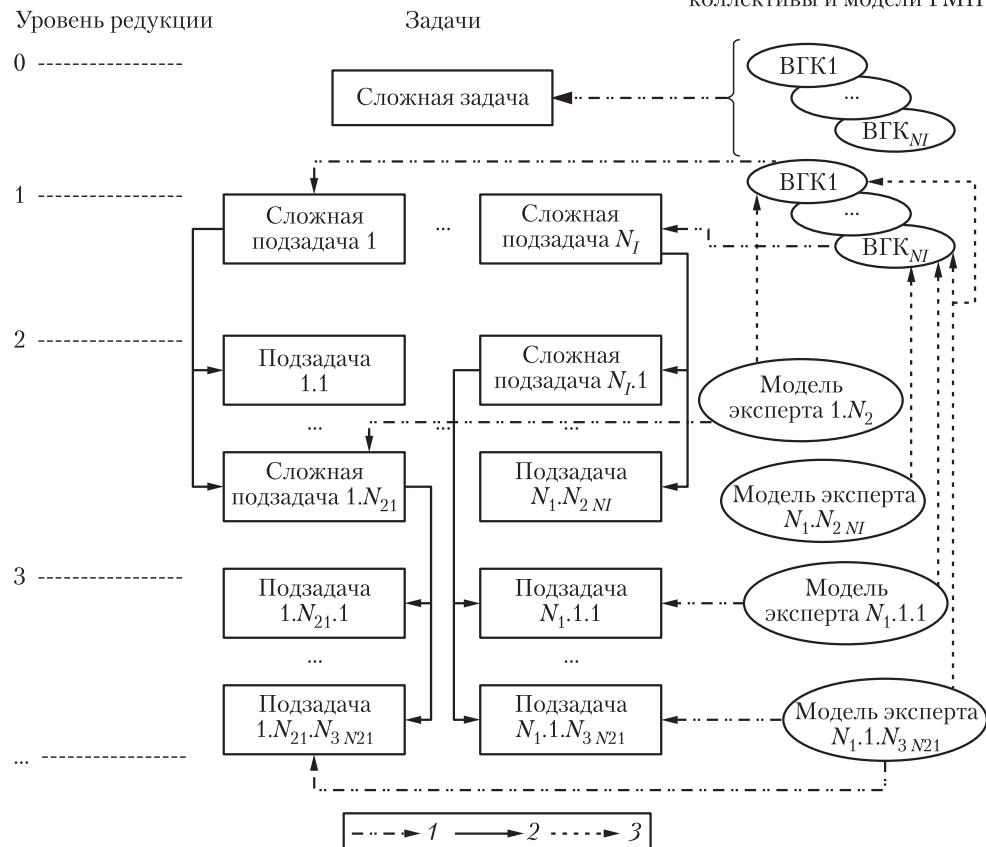


Рис. 2 «Соответствие» множеств проблем/задач и ВГК/моделей экспертов: 1 — решение задачи ВГК или моделью эксперта; 2 — включение «задача—подзадача»; 3 — включение «модель эксперта — ВГК»

участников сформированного ВГК; (4) когнитивный образ субъекта — процесса принятия решения ИГК — это также источник информации для удаленных экспертов и ЛПР; (5) ВГК, сформированный ЛПР для решения сложной задачи, описание структуры которого вместе с описанием ситуации его успешного применения могут быть сохранены во внутреннем формате инструментальной среды ВГК и инициированы в дальнейшем при необходимости.

Перед разработкой элементов инструментальной среды ВГК для конкретной естественной гетерогенной системы необходимо сначала идентифицировать сложную задачу (нулевой уровень редукции), для которой актуальна поддержка принятия решения, и редуцировать ее в декомпозицию (см. рис. 2) из L ($L \geq 2$)

уровней редукции. При необходимости параллельного решения более одной сложной задачи (первый уровень редукции — см. рис. 2) возможна инициализация нескольких ВГК в инструментальной среде. На рис. 2 между подзадачами как одного уровня редукции, так и разных не отражены отношения декомпозиции, но в зависимости от их наличия в ситуации нескольких параллельно работающих ВГК между последними также будут установлены соответствующие информационно-управляющие отношения (на рис. 2 не отражены).

Каждая из моделей ГМП разрабатывается способной решать некоторое множество подзадач определенного уровня редукции для последующего участия в ВГК. На первом уровне подзадачи всегда «неоднородные, сложные», и именно для решения одной из них ЛПР собирает ВГК из моделей, составляющих ГМП, и когнитивных образов объекта и субъекта. На уровнях редукции, начиная со второго, подзадачи могут быть как «однородными, простыми», так и «неоднородными». Модели из ГМП могут быть взаимно однозначно сопоставлены: (1) модель знаний одного эксперта (ведущего в целевой организации или в рассматриваемой проблемной области); (2) либо интегрированная модель знаний нескольких экспертов — профессионалов в своей области; (3) либо модель знаний, извлеченных из больших баз экспериментальных данных.

Если решение какой-либо подзадачи из декомпозиции необходимо контролировать и / или вмешиваться в процесс решения, то для соответствующей модели из ГМП разрабатывается аватара. В ВГК можно выделить следующие виды взаимодействий с аватарами: взаимодействие аватары с реальным экспертом и взаимодействие между аватарами и моделями экспертов.

На сегодняшний день можно говорить о двух способах организации взаимодействия аватары и реального эксперта: (1) взаимодействие с использованием нейрокомпьютерных интерфейсов (подключение виртуальной руки к мозгу обезьян [9], хранение и передача знаний и опыта [10]); (2) взаимодействие с использованием органов чувств эксперта: невербальный и вербальный. Палитра невербальных феноменов достаточно разнообразна и сводится к существованию четырех основных каналов: оптическому (визуальному, по Н. И. Шевандрину), акустическому, тактильному (такесическому, по В. А. Лабунской), ольфакторному (обонятельному). По этим каналам взаимодействуют в процессе общения.

Аватара должна передавать всю необходимую информацию и выполнять следующие функции коммуникации: (1) информационная функция: выражение идей, понятий, решений и сообщение их другим коммуникантам (аватарам и моделям из ГМП); (2) оценочная: выражение оценок и отношений реальных участников (в том числе из наблюдений за когнитивным образом субъекта).

Коллектив реальных экспертов (удаленных и сотрудников отдела), формирующийся реальным ЛПР-пользователем в зависимости от условий решения сложной задачи, получает доступ через Интернет к сформированному ВГК. К инструментальной среде есть доступ только у ЛПР-руководителя отдела.

Сформированный таким образом ВГК — ИГК (V моделей экспертов в составе) с когнитивными образами объекта и субъектов, а также запланированными для

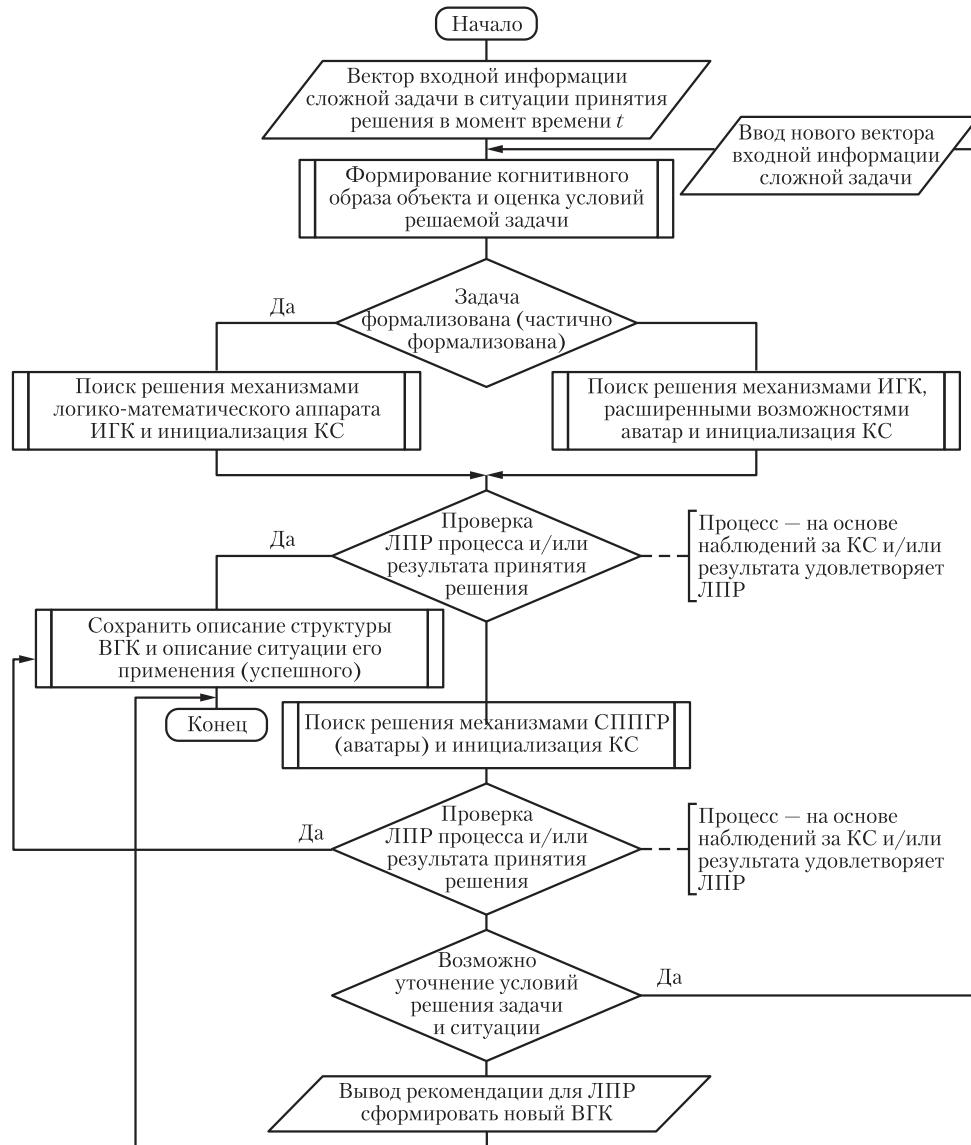


Рис. 3 Общая схема переключения режимов ВГК: КС — когнитивный образ субъекта

ряда моделей экспертов A аватарами — может работать в нескольких режимах, общая схема переключения между которыми представлена на рис. 3.

Первый вариант — режим ИГК с V моделями экспертов в составе: если решаемая задача формализована или частично формализована, то для поиска ре-

шений подключается опыт, профессиональные, теоретические знания экспертов из ГМП. Второй — режим ВГК с A_1 ($A_1 \leq A$) аватарами и ($V - A_1$) моделями экспертов — когда есть неопределенность, не снимаемая точным анализом и логико-математическими рассуждениями. Тогда приводятся в действие механизмы СППГР для расширения возможностей действующего ИГК. Третий — режим СППГР, когда все модели экспертов ИГК заменяются аватарами, а решение принимается реальными экспертами, общающимися в виртуальной среде, причем аватары все равно передают информацию когнитивному образу субъекта и участники обсуждения могут наблюдать «со стороны» за процессом принятия ими решения и корректировать его.

Либо, принимающее решения, по результатам оценки входной информации определяет включение первого или второго режима, после неудачной отработки которого, исходя из наблюдений за когнитивным образом процесса принятия решения или оценки его результата, запускается режим СППГР. Каждая неудачная итерация алгоритма требует либо уточнения условий решения задачи, либо формирования лицом, принимающим решения, ВГК с новой структурой.

Когнитивные образы субъектов и объекта — визуально-пространственный интеллект — обеспечивают способность воспринимать зрительную и пространственную информацию, модифицировать ее и воссоздавать зрительные образы без обращения к исходным стимулам, трансформировать пространство. Это делает эксперта восприимчивым к форме, линиям, цвету и отношениям между объектами, отсылает его к отдельным словам или образам и создает цельную картину с внутренними взаимосвязями.

Таким образом, определены общие принципы организации инструментальной среды ВКГ и формирования в ней ВГК для решения сложных задач первого уровня редукции (см. рис. 2).

3 Схема ролевых концептуальных моделей виртуального гетерогенного коллектива

Виртуальный гетерогенный коллектив будем рассматривать как ИГК, расширенный возможностями СППГР (аватары на рис. 1) и когнитивной компьютерной графики (когнитивные образы субъекта и объекта на рис. 1). В рамках концепции «синергетический искусственный интеллект — ИГК» [6, 11, 12] и языка схем ролевых концептуальных моделей [11] остановимся для исследования на МФГИС [2, 5] и ГиИМАС [2, 7].

Тогда можно записать схемы ролевых концептуальных моделей мелкоузернистого (1) и многоагентного (2) ВГК, ИГК которых — МФГИС и ГиИМАС соответственно. Для этого введем отношения: R^{st} — «иметь состояние»; R^{pr} — «иметь свойство»; R^{met} — «иметь метод»; R^{res} — отношение на ресурсах; R^{vz} — отношение взаимозамены. Тогда схема ролевых концептуальных моделей мелкоузернистого ВГК (ВГК_F) может быть записана в соответствии с концептуальной моделью ВГК (см. рис. 1) и схемой (5.28) из [2] МФГИС как

$$\begin{aligned}
 \text{VGK}_F(t) = & R^{\text{met}}(\text{res}_F, \text{MET}_F^i) \wedge R^{\text{pr}}(\text{res}_F, \overline{D}_F) \wedge R^{\text{res}}(\overline{D}_F, \text{ko}_F) \wedge \\
 & \wedge R^{\text{pr}}(\text{res}_F, \overline{G}_F) \wedge R^{\text{st}}(\text{res}_F, \overline{s}t) \wedge R_{f1}(\overline{D}_F(t), \overline{s}t(t)) \wedge R_{f2}(\overline{s}t(t), \overline{G}_F(t)) \wedge \\
 & \wedge {}^{\psi\varphi}R_{\text{int}}(\text{RES}^{\text{ft}}, \text{RES}^{\text{ft}}) \wedge R^{\text{vz}}(\text{RES}^{\text{ft}}, A_F^h) \wedge R_D(\overline{D}_F, D_F^n) \wedge R_G(G_F^n, \overline{G}_F) \wedge \\
 & \wedge R_2(\text{res}_F, Z^n) \wedge {}^{\lambda\mu}R_{\text{int}}(z_i, Z_i^n) \wedge R^{\text{pr}}(\text{RES}^{\text{ft}}, \text{KS}) \wedge R^{\text{pr}}(\text{res}_F, A_F^h), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где res_F — знак ВГК $_F$; MET_F^i — интегрированный метод; \overline{D}_F — вектор исходных данных сложной задачи, описывающий когнитивный образ объекта ko_F и передаваемый на вход одного или нескольких элементов из RES^{ft} ; A_F^h — множество аватар; RES^{ft} — множество моделей экспертов M^h , решающих подзадачи из декомпозиции сложной задачи; \overline{G}_F — вектор выходных данных сложной задачи; $\overline{s}t$ — вектор состояния ВГК F , формирующийся из состояний элементов из RES^{ft} и активных аватар из A_F^h ; ${}^{\psi\varphi}R_{\text{int}}$ — отношения интеграции элементов φ и ψ из RES^{ft} (и/или аватар из A_M^h , которые их заменили); D_F^n и G_F^n — множество свойств «вход» и «выход» элементов из RES^{ft} (и/или аватар из A_M^h , которые их заменили) соответственно; R_{f1} и R_{f2} — отношения функционирования ВГК F ; R_D и R_G — отношения «входа» ВГК F и «входов» элементов (и/или аватар из A_M^h , которые их заменили), а также «выходов» элементов (и/или аватар из A_M^h , которые их заменили) и «выхода» ВГК F соответственно; $R_2(\text{res}_F, Z^n)$ — отношение включения — «знак ВГК F включает множество элементов-зерен для конструирования функциональных и технологических элементов»; ${}^{\lambda\mu}R_{\text{int}}(z_i, Z_i^n)$ — отношение интеграции « i -е зерно z_i интегрируется с i -м подмножеством множества элементов-зерен»; KS — схема ролевых концептуальных моделей, описывающая «когнитивный образ субъекта».

В соответствии с концептуальной моделью ВГК (см. рис. 2) и схемой (4.31) из [2] схема ролевых концептуальных моделей многоагентного ВГК $_M$:

$$\begin{aligned}
 \text{VGK}_M(t) = & R^{\text{met}}(\text{res}_M, \text{MET}_M^l) \wedge R^{\text{pr}}(\text{res}_M, \overline{D}_M) \wedge R^{\text{res}}(\overline{D}_M, \text{ko}_M) \wedge \\
 & \wedge R^{\text{pr}}(\text{res}_M, \overline{G}_M) \wedge R^{\text{st}}(\text{res}_M, \overline{s}t^a) \wedge R_{f1}(\overline{D}_M(t), \overline{s}t^a(t)) \wedge R_{f2}(\overline{s}t^a(t), \overline{G}_M(t)) \wedge \\
 & \wedge R^{\text{res}}(\text{res}_M, \text{res}^p) \wedge R^{\text{res}}(\text{res}_M, \text{res}^l) \wedge R^{\text{res}}(\text{res}_M, \text{res}^o) \wedge R^{\text{res}}(\text{res}_M, \text{res}^{\text{ar}}) \wedge \\
 & \wedge R_D(\overline{D}_M, D_M^n) \wedge R^{\text{vz}}(\text{RES}^{\text{ag}}, A_M^h) \wedge R_G(G_M^n, \overline{G}_M) \wedge R_3(\text{res}^{\text{ar}}, K^a) \wedge \\
 & \wedge R_4(\text{res}^{\text{ar}}, C^a) \wedge R^{\text{pr}}(\text{RES}^{\text{ag}}, \text{KS}^{\text{ag}}) \wedge R^{\text{pr}}(\text{res}_F, A_M^h), \quad (2)
 \end{aligned}$$

где res_M — знак ВГК $_M$; MET_M^l — интегрированный метод; \overline{D}_M — вектор исходных данных сложной задачи (совокупность информационных и материальных потоков, идущих из среды к агентам — сенсорная информация), описывающей

когнитивный образ объекта ком и передаваемый на вход одного или нескольких элементов из RES^{ag} (и/или аватар из A_M^h , которые заменили агентов); RES^{ag} — множество агентов; A_M^h — множество аватар; \overline{D}_M — вектор выходных данных сложной задачи; $\overline{\text{st}}^a$ — вектор состояния ВГК_M , формирующийся из состояний его агентов и активных аватар; res^p — протокол взаимодействий «агент–агент», «агент–аватар»; res^l — язык обмена; res^o — онтология; res^{ar} — набор базовых архитектур; D_M^n и G_M^n — множество свойств «вход» (сенсорная информация) и «выход» (команды эфекторам) агентов из RES^{ag} (и/или аватар из A_M^h , которые заменили агентов) соответственно; R_{f1} и R_{f2} — отношения функционирования ВКГ_F ; R_D и R_G — отношения «входа» ВГК_M и сенсоров агентов (и/или аватар из A_M^h , которые заменили агентов), а также эфекторов агентов (и/или аватар из A_M^h , которые заменили агентов) и «выхода» ВКГ_M соответственно; $R_3(\text{res}^{\text{ar}}, K^a)$ — отношения между архитектурой ВКГ_M и знаниями агентов (и/или аватар из A_M^h , которые заменили агентов); $R_4(\text{res}^{\text{ar}}, C^a)$ — отношения между архитектурой ВКГ_M и целями агентов (и/или аватар из A_M^h , которые заменили агентов); KS^{ag} — схема ролевых концептуальных моделей, описывающая «когнитивный образ субъекта».

Таким образом, введены схемы (1) и (2) ВГК, основанных на МФГиИС и ГиИМАС соответственно.

На следующем этапе исследования необходимо:

- (1) выбрать сложную задачу с L не меньше двух уровней редукции для формирования множества моделей экспертов, включающего не менее четырех с моделью ЛПР;
- (2) разработать и исследовать схемы элементов A_F^h и A_M^h — концептуальные модели аватар и их взаимодействий с реальными и виртуальными участниками коллектива согласно схемам (1) и (2) соответственно;
- (3) спроектировать лабораторные компьютерные модели инструментальных сред ВКГ_F и ВКГ_M и провести ряд экспериментов с разными составами коллективов и в разных режимах работы. Когнитивная составляющая на этом этапе исследования рассматриваться не будет.

4 Заключение

Исследования ВГК открывают путь к повышению качества решений коллективного интеллекта за круглым столом. В ВГК эксперты заменяются их базами знаний и формируется ГМП (моделируется логико-математический интеллект). При этом формируются и когнитивные визуальные образы субъекта, и визуальный образ объекта управления — визуальное гетерогенное поле. Когда область явлений хорошо изучена, (частично) formalизована, ВГК интегрирует метод решения задачи над ГМП, а при неопределенности подключает возможности СППГР (аватары) и визуальное гетерогенное поле.

Литература

1. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика. — М.: Наука, 1986. 288 с.
2. *Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В., и др.* Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. — М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с.
3. *Самсонова М. В., Ефимов В. В.* Технология и методы коллективного решения проблем. — Ульяновск: УлГТУ, 2003. 152 с.
4. *Спиридонов В. Ф.* Психология мышления: Решение задач и проблем. — М.: Генезис, 2006. 319 с.
5. *Колесников А. В., Кириков И. А.* Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. — М.: ИПИ РАН, 2007. 387 с.
6. *Колесников А. В.* Моделирование естественных гетерогенных систем коллективного принятия решений // Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2015): Тр. VI Междунар. конф. — М.: ИСА РАН, 2015. Т. 1. С. 7–16.
7. *Кириков И. А., Колесников А. В., Листопад С. В., Солдатов С. А.* Гетерогенные интеллектуальные компьютерные системы поддержки принятия решений: модели координации и согласованности // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 2. С. 96–110. doi: 10.14357/08696527150206.
8. *Кириков И. А., Колесников А. В., Листопад С. В., Румовская С. Б.* Виртуальные гетерогенные коллективы, поддерживающие принятие решений // Системы и средства информатики, 2015. Т. 1. № 3. С. 126–149. doi: 10.14357/08696527150308.
9. *O'Doherty J. E., Lebedev M. A., Ifft P. J., et al.* Active tactile exploration using a brain-machine-brain interface // Nature, 2011. Vol. 479. No. 7372. P. 228–231. doi: 10.1038/nature10489.
10. *Pais-Vieira M., Lebedev M., Kunicki C., Wang J., Nicolelis M. A. L.* A brain-to-brain interface for real-time sharing of sensorimotor information. <http://www.nicolelislab.net/wp-content/uploads/2013/02/SREP-12-04012-5e86523b-1562-41b8-bcd1-c83506eb9bc.pdf>. doi: 10.1038/srep01319.
11. *Колесников А. В.* Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. — СПб.: СПбГТУ, 2001. 711 с.
12. *Тарасов В. Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.

Поступила в редакцию 15.08.16

CONCEPTUAL MODEL OF VIRTUAL HETEROGENEOUS COLLECTIVE FOR SUPPORTING GROUP DECISION-MAKING

**I. A. Kirikov¹, A. V. Kolesnikov^{1,2}, S. B. Rumovskaya¹, A. V. Barzenkov²,
and E. V. Petrenko²**

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: The paper considers a new class of intelligent information systems — virtual heterogeneous collectives of people (through avatars) and virtual models of experts. In such collectives, the means of computer technology are used not only for providing the communication environment, avatar is associated with interface for control by real expert of one of the models from the heterogeneous model field and for displacement the model by itself during solving the tasks in collective. The authors represent the conceptual model of heterogeneous collectives in terms of fine-grained functional hybrid intelligent systems and hybrid intelligent multiagent systems. The paper also considers special aspects of virtual heterogeneous collective participants, relations between them, and their inheritance of fundamentals of artificial heterogeneous collectives and group decision support systems.

Keywords: artificial heterogeneous collective; virtual heterogeneous collective; group decision support systems

DOI: 10.14357/08696527160307

Acknowledgments

The work has been done under partial support of the Russian Foundation for Basic Research (grants Nos. 16-07-00272 A and 16-07-00271 A).

References

1. Pospelov, D. A. 1986. *Situatsionnoe upravlenie: Teoriya i praktika* [Situation control: Theory and practice]. Moscow: Nauka. 288 p.
2. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, S. V. Listopad, et al. 2011. *Reshenie slozhnykh zadach kommitoyazhera metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh sistem* [Solving of the complex traveling salesman problem by means of functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 295 p.
3. Samsonova, M. V., and V. V. Efimov. 2003. *Tekhnologiya i metody kollektivnogo resheniya problem* [Technology and methods of group decision]. Ulyanovsk: UIGTU. 152 p.

4. Spiridonov, V. F. 2006. *Psichologiya myshleniya: Reshenie zadach i problem* [The psychology of mind: Solving of tasks and problems]. Moscow: Genesis. 319 p.
5. 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.
6. 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.
7. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, S. V. Listopad, and S. A. Soldatov. 2015. Geterogennye intellektual'nye kompyuternye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: Modeli koordinatsii i soglasovannosti [Heterogeneous intellectual computer decision-support systems: Models of coordination and conformance]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(2):96–110. doi: 10.14357/08696527150206.
8. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, S. V. Listopad, and S. B. Rumovskaya. 2015. Virtuálnye geterogennye kollektivy, podderzhivayushchie prinyatie resheniy [Virtual heterogeneous collectives for supporting decision-making]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 1(3):126–149. doi: 10.14357/08696527150308.
9. O'Doherty, J. E., M. A. Lebedev, P. J. Ifft, et al. 2011. Active tactile exploration using a brain-machine-brain interface. *Nature* 479(7372):228–231. doi: 10.1038/nature10489.
10. Pais-Vieira, M., M. Lebedev, J. Wang, and M. A. L. Nicolelis. A brain-to-brain interface for real-time sharing of sensorimotor information. doi: 10.1038/srep01319. Available at: <http://www.nicolelislab.net/wp-content/uploads/2013/02/SREP-12-04012-5e86523b-1562-41b8-bcd1-c83506e6b9bc.pdf> (accessed July 15, 2016).
11. Kolesnikov, A. V. 2001. *Gibridnye intellektual'nye sistemy. Teoriya i tekhnologiya razrabotki* [Hybrid artificial systems. Theory and development technology]. St. Petersburg: SPbGU. 711 p.
12. 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.

Received August 15, 2016

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 Baltic Federal University, 14 Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of

Conceptual model of virtual heterogeneous collective for supporting group decision-making

the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; avkolesnikov@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

Barzenkov Aleksandr V. (b. 1992) — PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation; avbarzenkov@mail.ru

Petrenko Evgeny V. (b. 1992) — PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation; leading programmer, Kaliningrad Innovation Center “Technocenose;” 1 Sovetskiy Pr., Kaliningrad 236022, Russian Federation; petrenkoe@hotmail.com

СМЕСИ НОРМАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ОПОРНЫХ ТОЧЕК ПО СИГНАЛУ МИОГРАММЫ*

T. B. Захарова¹, M. M. Подлесный²

Аннотация: Данная статья посвящена исследованию вероятностных характеристик миограммы, представляющей собой запись электрической активности мышц. Она повсеместно используется в медицинских исследованиях, в том числе для определения опорных точек в задаче локализации функциональных областей головного мозга. Предлагается в качестве математической модели шума миограммы использовать конечные сдвиг-масштабные смеси нормальных законов. Задача разделения смесей решается с помощью стохастического EM (expectation–maximization) алгоритма, и полученные данные используются для нахождения точек привязки на основе CUSUM-статистик. Далее проводится сравнительный анализ нового алгоритма с уже используемым в МЭГ-центре методом, основанным на пороговой обработке оконной дисперсии.

Ключевые слова: миограмма; смеси вероятностных распределений; стохастический EM-алгоритм; CUSUM-статистики

DOI: 10.14357/08696527160308

1 Введение

Одним из важнейших направлений современной медицины является изучение активности головного мозга и определение расположения его функциональных зон. Вследствие полученных травм и различных поражений центральной нервной системы, а также в силу индивидуальной пластичности мозга локализация по анатомическим маркерам не может быть выполнена с необходимой точностью. С этой целью используется магнитоэнцефалография (МЭГ) в комбинации с магнитно-резонансной томографией.

К сожалению, регистрируемое магнитное поле, возникающее в результате электрической активности мозга, очень сильно зашумлено (рис. 1). Чтобы увеличить отношение полезного сигнала к шуму, в медицинских исследованиях принято использовать метод возбужденных потенциалов: пациент многократно совершает какое-либо действие для активации зон интереса, в это время за-

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-11-00364).

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики; Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, lsa@cs.msu.ru

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, podlesnymatvey@inbox.ru

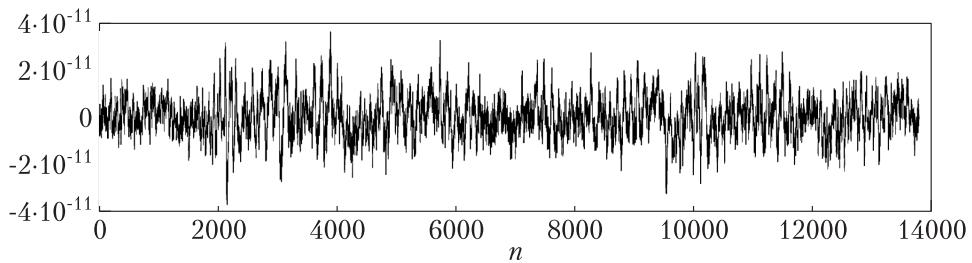


Рис. 1 Сигнал МЭГ

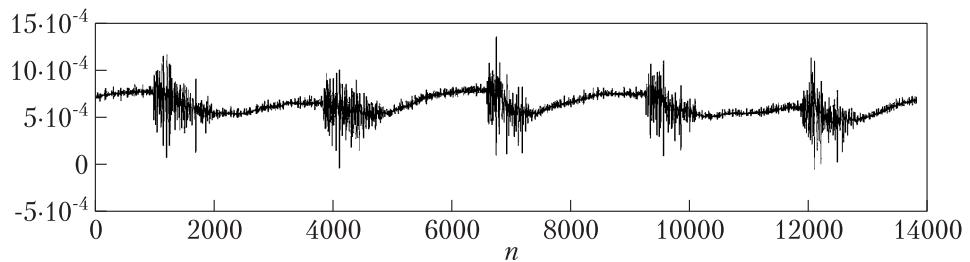


Рис. 2 Сигнал миограммы

писываются данные о его состоянии для дальнейшего усреднения. Сигналы, полученные таким способом, имеют циклическую нестационарную природу [1].

Усреднив сигнал МЭГ по точкам начала движения, можно определить магнитометры, на которых отклик на движение является наибольшим, и далее для локализации активных зон решить обратную задачу [2].

В силу неустойчивости обратных задач по начальным данным неточное определение точек привязки может привести к значительным ошибкам локализации. Именно поэтому проблеме поиска опорных точек уделяется так много внимания. В большинстве работ по данной тематике точки начала движения определяются по миограмме, уровень шума которой находится на приемлемом уровне (рис. 2), поэтому исследование ее вероятностных характеристик представляет большой практический интерес.

Экспериментальные данные предоставлены центром нейрокогнитивных исследований при Московском городском психолого-педагогическом университете.

2 Предварительная обработка сигналов

2.1 Разбиение сигнала на эпохи

В нашем распоряжении имеются записи магнитоэнцефалограммы и миограммы пациента и, кроме того, данные с трехосного акселерометра, закрепленного на пальце. Все сигналы имеют частоту дискретизации 1 кГц.

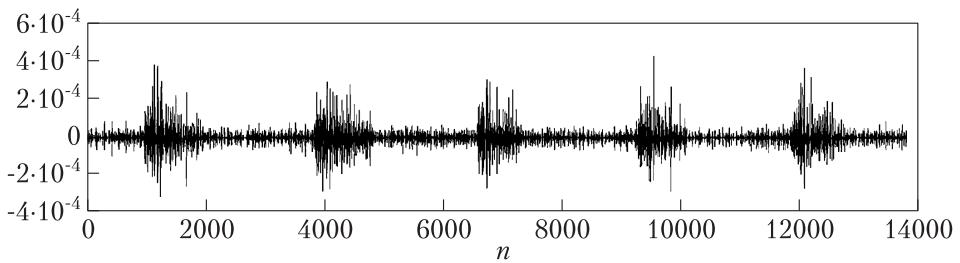


Рис. 3 Приращения миограммы

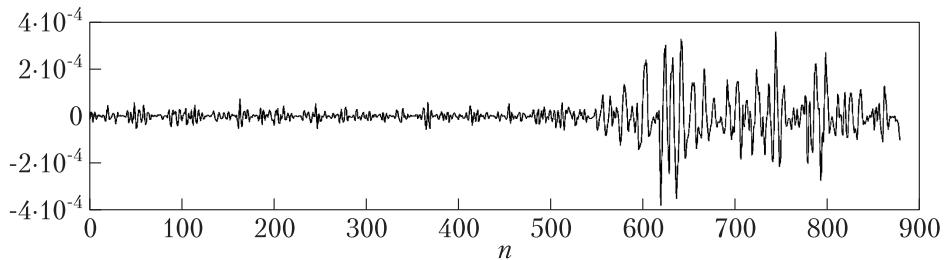


Рис. 4 Приращения миограммы на одной эпохе

Для дальнейшей обработки миограммы целесообразно убрать тренд, перейдя к приращениям (рис. 3).

Затем, используя внешний сигнал с акселерометра, разобьем все наблюдения на отрезки, отвечающие одному движению, или эпохи (рис. 4).

2.2 Задача о разладке

Будем интерпретировать сигнал миограммы как наблюдения за случайным процессом, тогда опорную точку на отдельно взятой эпохе можно найти, решив так называемую задачу о разладке. Приведем ее классическую постановку.

Пусть последовательно во времени проводятся измерения информации о случайному процессе и в какой-то заранее неизвестный момент времени происходит изменение его вероятностных характеристик. Задача обнаружения произошедшего изменения быстрейшим образом носит название задачи скорейшего обнаружения момента появления разладки.

Один из методов ее решения приведен в [3]. Предположим, что $x_1, x_2, \dots, x_{\theta-1}, x_\theta, x_{\theta+1}, \dots$ — это наблюдения над независимыми случайными величинами $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{\theta-1}, \xi_\theta, \xi_{\theta+1}, \dots$ такими, что в моменты времени $k = 1, 2, \dots, \theta - 1$ они имеют распределение с плотностью $f_\infty(x)$, а в моменты $k = \theta, \theta + 1, \dots$ с плотностью $f_0(x)$. Параметр θ считается заранее неизвестным и принимающим значения $1, \dots, \infty$.

Для $n \geq 1, \theta > 1$ положим

$$p_\theta(x_1, \dots, x_n) = f_\infty(x_1) \cdots f_\infty(x_{\theta-1}) f_0(x_\theta) \cdots f_0(x_n).$$

При $\theta = 1$

$$p_\theta(x_1, \dots, x_n) = f_0(x_1) \cdots f_0(x_n)$$

и при $\theta = \infty$

$$p_\infty(x_1, \dots, x_n) = f_\infty(x_1) \cdots f_\infty(x_n).$$

Введем следующую статистику:

$$\begin{aligned} \gamma_n &= \sup_{\theta \geq 1} \frac{p_\theta(x_1, \dots, x_n)}{p_\infty(x_1, \dots, x_n)} = \\ &= \max \left\{ \frac{p_0(x_1, \dots, x_n)}{p_\infty(x_1, \dots, x_n)}, \frac{p_0(x_2, \dots, x_n)}{p_\infty(x_2, \dots, x_n)}, \dots, \frac{p_0(x_n)}{p_\infty(x_n)}, 1 \right\} = \\ &= \max \left\{ 1, \max_{1 \leq \theta \leq n} \prod_{k=\theta}^n \frac{f_0(x_k)}{f_\infty(x_k)} \right\} \end{aligned}$$

и положим

$$T_n = \log \gamma_n = \max \left\{ 0, \max_{1 \leq \theta \leq n} \sum_{k=\theta}^n \log \frac{f_0(x_k)}{f_\infty(x_k)} \right\} = \max \left\{ 0, \max_{1 \leq \theta \leq n} \sum_{k=\theta}^n \zeta_k \right\},$$

где

$$\zeta_k = \log \frac{f_0(x_k)}{f_\infty(x_k)}.$$

Введенные статистики T_n , $n \geq 1$, обладают важным рекуррентным свойством

$$T_n = \max [0, T_{n-1} + \zeta_n], \quad (1)$$

которое удобно использовать при написании программы.

Статистики $\gamma = (\gamma_n)_{n \geq 1}$ называют обобщенными отношениями правдоподобия, а $T = (T_n)_{n \geq 1}$ — статистиками CUSUM (англ. *cumulative sums*).

На рис. 5 приведен типичный вид графика T_n . При $n < \theta$ она принимает неотрицательные значения, близкие к нулю, а при $n > \theta$ начинает в среднем возрастать. Приведенный рисунок демонстрирует то, что статистики T_n позволяют «ухватывать» момент появления разладки в момент θ . Для применения этих статистик к реальным данным надо знать или уметь хорошо оценивать величины $\zeta_n = f_0(x_n)/f_\infty(x_n)$, когда плотности $f_0(x)$ и $f_\infty(x)$ точно не известны. Этому и посвящена дальнейшая часть работы.

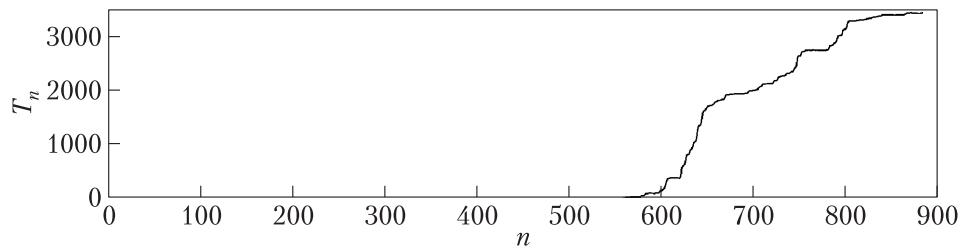


Рис. 5 График статистики CUSUM

2.3 Оценка плотности

Были предприняты попытки отнести распределение приращений миограммы на участках покоя к одному из известных симметричных распределений случайных величин. Например, проверены сложные гипотезы о принадлежности

наблюдаемых выборок нормальному и логистическому законам, параметры которых оценивались по этим самим выборкам методом максимального правдоподобия.

Соответствующие гипотезы в большинстве случаев были отвергнуты критериями согласия Колмогорова–Смирнова [4, с. 214] и хи-квадрат [4, с. 204]. Здесь и далее при проверке гипотез уровень значимости был положен стандартным: 0,05.

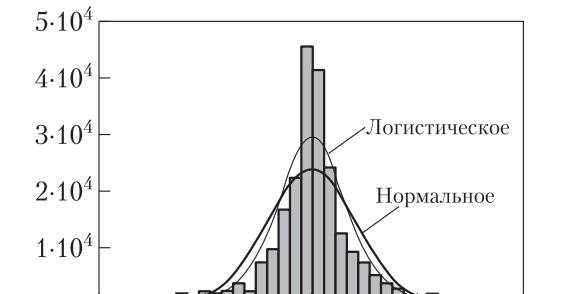


Рис. 6 Пример гистограммы приращений миограммы на одном участке покоя

На рис. 6 видно, что наблюдаемое распределение имеет острый пик и тяжелые хвосты.

Также были проверены гипотезы об однородности приращений миограммы на различных участках покоя. Непараметрический критерий сдвига Крускала–Уоллиса [4, с. 466] подтвердил равенство средних значений сигналов (они близки к нулю). Были построены матрицы статистических сравнений распределений на соседних участках на основе двухвыборочного критерия согласия Колмогорова–Смирнова [4, с. 227] и критерия масштаба Ансари–Бредли [4, с. 492]. Элемент матрицы принимает значение «1», если гипотеза H_0 о совпадении распределений отвергается, и «0» в противном случае. Пример такой матрицы приведен на рис. 7. Заметим, что она является симметричной и содержит мало нулей, не считая главной диагонали, что говорит о том, что наблюдаемый сигнал является нестационарным.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
2	1	0	1	1	1	1	1	1	0
3	1	1	0	1	1	1	1	1	0
4	1	1	1	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	0	0	1	0	1
6	0	1	1	1	0	0	1	0	1
7	1	1	1	1	1	1	0	1	1
8	0	1	1	1	0	0	1	0	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0

Рис. 7 Пример матрицы статистических сравнений на основе критерия Ансари–Бредли для 9 соседних участков покоя

3 Смеси вероятностных распределений

3.1 Основные определения

В тех случаях, когда форму класса не удается описать каким-либо одним распределением, можно попробовать описать ее смесью распределений.

Дадим определение дискретной смеси. Рассмотрим функцию $F(x, y)$, определенную на множестве $\mathbb{R} \times \mathbb{Y}$. Пусть при каждом фиксированном y функция $F(x, y)$ является функцией распределения по x и задан набор вероятностей p_1, p_2, \dots , где $\sum_{j \geq 1} p_j = 1$. Получаем *дискретную* смесь:

$$H(x) = \sum_{j \geq 1} p_j F(x, y_j), \quad x \in \mathbb{R}.$$

Функции распределения $F(x, y_j)$ называют *компонентами* смеси $H(x)$, а числа p_j — *весами* соответствующих компонент. Если в дискретной смеси число ненулевых весов конечно, то такая смесь называется *конечной*.

Рассмотрим один важный тип смесей — сдвиг-масштабные смеси. Для определения дискретной сдвиг-масштабной смеси функции распределения $F(x)$ положим $y_j = (\sigma_j, a_j)$, где $a_j \in \mathbb{R}$, $\sigma_j > 0$, $j = 1, \dots, k$, и получим

$$H(x) = \sum_{j=1}^k p_j F\left(\frac{x - a_j}{\sigma_j}\right), \quad x \in \mathbb{R},$$

и соответствующую ей смесь плотностей

$$h(x) = \sum_{j=1}^k \frac{p_j}{\sigma_j} f\left(\frac{x - a_j}{\sigma_j}\right), \quad x \in \mathbb{R}.$$

3.2 Идея ЕМ-алгоритма

Пусть плотность наблюдаемой случайной величины \mathbf{X} имеет вид (для конечных смесей нормальных законов это условие выполнено)

$$f_{\theta}^{\mathbf{X}}(x) = \sum_{i=1}^k p_i \psi_i(x; t_i), \quad (2)$$

где $k \geq 1$ — заданное натуральное число; ψ_1, \dots, ψ_k — известные плотности распределения; $\theta = (p_1, \dots, p_k, t_1, \dots, t_k)$ — неизвестный параметр; $p_i \geq 0$, $i = 1, \dots, k$, — веса компонент, $p_1 + \dots + p_k = 1$; t_i , $i = 1, \dots, k$, — многомерные параметры.

Задачей разделения смеси (2) называют задачу статистического оценивания параметров $\theta = (p_1, \dots, p_k, t_1, \dots, t_k)$ по известным реализациям случайной величины \mathbf{X} .

Предположим, что помимо наблюдаемой случайной величины \mathbf{X} задана ненаблюдаемая случайная величина \mathbf{Y} , содержащая информацию о номерах компонент, в соответствии с которыми генерируются значения случайной величины \mathbf{X} , т. е. при каждом наблюдении $j = 1, \dots, n$ сначала реализуется значение y_j случайной величины \mathbf{Y} , указывающее на номер компоненты смеси, являющейся распределением случайной величины \mathbf{X} при j -м наблюдении, а затем только значение x_j . Считаем, что пары значений (x_j, y_j) являются стохастически независимыми реализациями пары случайных величин (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) .

Зная совместную плотность $f_{\theta}(x, y)$ и значение наблюдаемой величины $\mathbf{X} = x$, можно ввести полную функцию правдоподобия:

$$L(\theta; x, y) = f_{\theta}(x, y), \quad \theta \in \Theta. \quad (3)$$

Классическую функцию правдоподобия

$$L(\theta; x) = f_{\theta}^{\mathbf{X}}(x) \quad (4)$$

в таком случае можно трактовать как неполную функцию правдоподобия.

ЕМ-алгоритм представляет собой итерационную процедуру, в результате которой вычисляется последовательность значений $\{\theta^{(m)}\}_{m \geq 1}$ параметра θ , максимизирующая функции (3) и (4). Полное описание алгоритма можно найти в [5].

Отметим особенности ЕМ-алгоритма, существенно ограничивающие возможность его применения в чистом виде на практике. Максимизируемый функционал может иметь большое количество локальных экстремумов, поэтому для ЕМ-алгоритма характерны такие черты, как застревание в локальных максимумах, зависимость решения от начального приближения и медленная сходимость при его неудачном выборе. В связи с этим существует большое число модификаций алгоритма. Одну из них подробно рассмотрим в следующей части.

3.3 SEM-алгоритм

Как было сказано ранее, классический EM-алгоритм находит не глобальный максимум функции правдоподобия, а локальный, ближайший к начальному приближению, т. е. относится к категории «жадных» алгоритмов. Одним из эффективных способов противодействия этому свойству является случайная, но целенаправленная «перетасовка» выборки на каждой итерации. Этот механизм лежит в основе модификации, носящей название SEM-алгоритма (англ. *stochastic EM-algorithm*).

Представим ненаблюдаемую информацию в следующей форме. Будем считать, что каждому наблюдению x_j соответствует вектор $\vec{y}_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{kj})$, $j = 1, \dots, n$, где k — число компонент смеси, n — объем выборки и

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если наблюдение } x_j \text{ порождено } i\text{-й компонентой смеси;} \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

В терминах введенных величин $y = \vec{y}_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{kj})$, $j = 1, \dots, n$, логарифм полной функции правдоподобия для модели (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} \log L(\theta; x, y) &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k y_{ij} \log [p_i \psi_i(x_j; t_i)] = \\ &= \sum_{i=1}^k \log p_i \sum_{j=1}^n y_{ij} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n y_{ij} \log \psi_i(x_j; t_i). \quad (5) \end{aligned}$$

Векторы \vec{y}_j , $j = 1, \dots, n$, разбивают исходные наблюдения x на k кластеров $\mathcal{K}_1, \dots, \mathcal{K}_k$:

$$x = \mathcal{K}_1 \cup \dots \cup \mathcal{K}_k.$$

Для каждого $i = 1, \dots, k$ в множество \mathcal{K}_i входят те наблюдения x_j , которым соответствует $y_{ij} = 1$, причем $\mathcal{K}_i \cap \mathcal{K}_j = \emptyset$ при $i \neq j$. Обозначим число наблюдений, попавших в кластер \mathcal{K}_i , $i = 1, \dots, k$, через ν_i :

$$\nu_i = \sum_{j=1}^n y_{ij}.$$

Ясно, что $\nu_1 + \dots + \nu_k = n$. Продолжая (5), получаем:

$$\log L(\theta; x, y) = \sum_{i=1}^k \nu_i \log p_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j:x_j \in \mathcal{K}_i} \log \psi_i(x_j; t_i). \quad (6)$$

Предположим, что величины y_{ij} известны. Слагаемые в правой части (6) зависят от непересекающихся групп параметров, и, следовательно, максимизировать

функцию правдоподобия по θ можно по каждому из слагаемых в отдельности. Максимум первого по набору $p_1 + \dots + p_k = 1$ согласно методу неопределенных множителей Лагранжа достигается при

$$p_i^* = \frac{\nu_i}{n}. \quad (7)$$

Далее заметим, что

$$\sum_{j:x_j \in \mathcal{K}_i} \log \psi_i(x_j; t_i) = \log \prod_{j:x_j \in \mathcal{K}_i} \psi_i(x_j; t_i) \equiv \log L_i(t_i; \mathcal{K}_i),$$

где $L_i(t_i; \mathcal{K}_i)$ — это функция правдоподобия параметра t_i , построенная по кластеру \mathcal{K}_i в предположении, что каждый элемент подвыборки имеет плотность распределения $\psi_i(x; t_i)$. Положим

$$t_i^* = \arg \max_t L_i(t; \mathcal{K}_i), \quad i = 1, \dots, k, \quad (8)$$

тем самым доставив максимум второму слагаемому в правой части (6).

Таким образом, при умении моделировать величины y_{ij} оценки наибольшего правдоподобия параметров принятой модели (2) определяются соотношениями (7) и (8). Опишем итерационный SEM-алгоритм.

Предположим, что на m -й итерации известны значения $g_{ij}^{(m)}$ апостериорных вероятностей принадлежности наблюдения x_j , $j = 1, \dots, n$, к кластеру \mathcal{K}_i , $i = 1, \dots, k$, $\sum_{i=1}^k g_{ij}^{(m)} = 1$.

На первом этапе (S-этапе) для каждого $j = 1, \dots, n$ генерируются величины

$$\vec{y}_j^{(m+1)} = (y_{1j}^{(m+1)}, y_{2j}^{(m+1)}, \dots, y_{kj}^{(m+1)})$$

как реализации случайных векторов с полиномиальным распределением с параметрами 1 и $g_{1j}^{(m)}, \dots, g_{kj}^{(m)}$, где $g_{ij}^{(m)}$ — вероятность того, что компонента $y_{ij}^{(m+1)}$ равна единице. Наблюдаемая выборка $x = (x_1, \dots, x_n)$ разбивается на кластеры $\mathcal{K}_1^{(m+1)}, \dots, \mathcal{K}_k^{(m+1)}$ и происходит пересчет их численностей $\nu_1^{(m+1)}, \dots, \nu_k^{(m+1)}$ на $(m+1)$ -й итерации.

На втором этапе (M-этапе) согласно формулам (7) и (8) вычисляются оценки максимального правдоподобия компонент параметра θ :

$$p_i^{(m+1)} = \frac{\nu_i^{(m+1)}}{n}; \quad (9)$$

$$t_i^{(m+1)} = \arg \max_t L_i(t; \mathcal{K}_i^{(m+1)}), \quad i = 1, \dots, k. \quad (10)$$

На третьем заключительном этапе (Е-этапе) переназначаются вероятности g_{ij} . В соответствии с представлением $f_\theta(y|x) = f_\theta(x,y)/f_\theta^{\mathbf{X}}(x)$ для условной плотности ненаблюдаемой случайной величины \mathbf{Y} при известном значении наблюдаемой случайной величины $\mathbf{X} = x$ имеем:

$$g_{ij}^{(m+1)} = \frac{p_i^{(m+1)} \psi_i(x_j; t_i^{(m+1)})}{\sum_{r=1}^k p_r^{(m+1)} \psi_r(x_j; t_r^{(m+1)})}. \quad (11)$$

Выпишем в явном виде формулы, определяющие SEM-алгоритм, для случая смеси нормальных распределений, в которой

$$\psi_i(x; t_i) = \frac{1}{\sigma_i} \phi\left(\frac{x - a_i}{\sigma_i}\right), \quad x \in \mathbb{R}.$$

Соотношение (9) остается без изменений, а (10) преобразуется в пару соотношений:

$$\begin{aligned} a_i^{(m+1)} &= \frac{1}{\nu_i^{(m+1)}} \sum_{j=1}^n y_{ij}^{(m+1)} x_j = \frac{1}{\nu_i^{(m+1)}} \sum_{j:x_j \in \mathcal{K}_i^{(m+1)}} x_j; \\ \sigma_i^{(m+1)} &= \left[\frac{1}{\nu_i^{(m+1)}} \sum_{j=1}^n y_{ij}^{(m+1)} (x_j - a_i^{(m+1)})^2 \right]^{1/2} = \\ &= \left[\frac{1}{\nu_i^{(m+1)}} \sum_{j:x_j \in \mathcal{K}_i^{(m+1)}} (x_j - a_i^{(m+1)})^2 \right]^{1/2}. \end{aligned}$$

Выражение (11) принимает вид:

$$g_{ij}^{(m+1)} = \frac{(p_i^{(m+1)}) / (\sigma_i^{(m+1)}) \exp \left\{ -(1/2) \left((x_j - a_i^{(m+1)}) / \sigma_i^{(m+1)} \right)^2 \right\}}{\sum_{r=1}^k (p_r^{(m+1)}) / (\sigma_r^{(m+1)}) \exp \left\{ -(1/2) \left((x_j - a_r^{(m+1)}) / \sigma_r^{(m+1)} \right)^2 \right\}}.$$

Многочисленные реализации SEM-алгоритма показали, что он работает относительно быстро по сравнению с другими методами и, как правило, приводит к глобальному максимуму анализируемой функции правдоподобия. Также результаты его работы практически не зависят от начального приближения. Преимущества SEM обусловлены тем, что рандомизация «выбивает» оптимизационный процесс из локальных максимумов.

4 Результаты

Вернемся к задаче определения точек привязки. Напомним, что удалось разбить весь массив данных на эпохи, содержащие по одному движению. Попытаемся оценить плотность приращений миограммы отдельно на участках покоя, а именно: представить сигнал в виде двухкомпонентной сдвиг-масштабной смеси нормальных законов (опыт показал, что двух компонент достаточно).

Для разделения смеси используем SEM-алгоритм. Чтобы запустить итерационный процесс, требуется задать лишь начальное приближение вероятностей $g_{ij}^{(0)}$. Положим их равными между собой: $g_{ij}^{(0)} = 1/k = 1/2$, $i = 1, 2$, $k = 2$, $j = 1, \dots, n$.

Благодаря внешнему сигналу акселерометра известна окрестность, в которой нужно искать опорную точку. Отступив от нее на некоторый интервал влево, гарантированно окажемся на участке покоя. Хотя плотность можно было бы оценивать по всей эпохе с самого ее начала, ограничим «обучающую выборку», отобрав только наблюдения, ближайшие к моменту начала движения (на рис. 8 граница показана вертикальной пунктирной чертой; заметим, что обрезанная выборка выглядит более однородной).

Проверка качества аппроксимации велась по критериям согласия хи-квадрат и Колмогорова–Смирнова. В большинстве случаев соответствующая гипотеза H_0 не отвергалась.

Аналогичную процедуру проделаем для оценки плотности сигнала на участке движения с тем лишь отличием, что отступ берется вправо (рис. 9). Приближение получается более грубым в силу сложной природы движения, но достаточным для применения в CUSUM-статистиках.

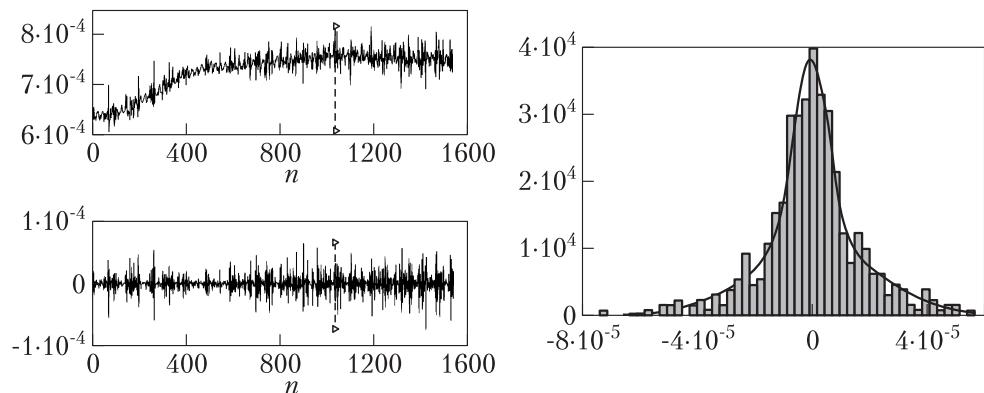


Рис. 8 Результаты работы SEM-алгоритма на участке покоя. В левом верхнем углу показана исходная миограмма, в нижнем – ее приращения. Справа изображена гистограмма приращений

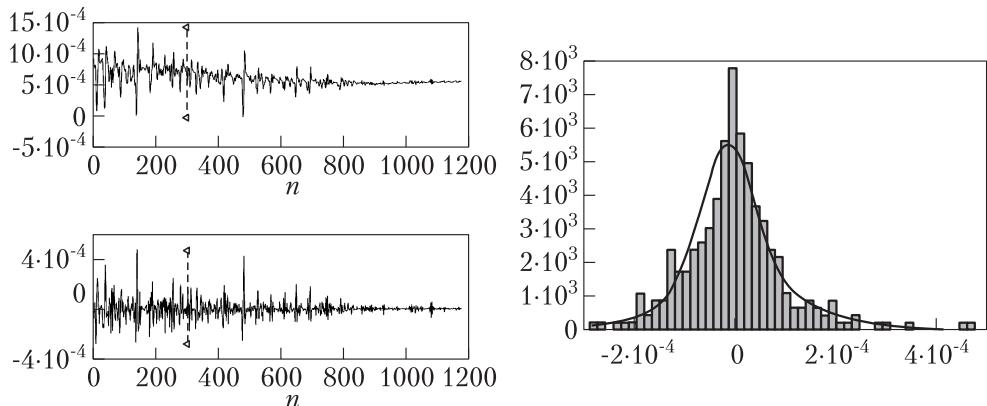


Рис. 9 Результаты работы SEM-алгоритма на участке движения

Определим критерий останова алгоритма разделения смеси. Итерации останавливаются, когда значения функционала $Q(\theta)$ или скрытых переменных G перестают существенно изменяться. Отметим, что скрытые переменные контролировать удобнее, так как они имеют смысл вероятностей и принимают значения из отрезка $[0, 1]$. В данной работе отслеживалось их среднее изменение $(1/(kn)) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n |g_{ij}^{(m+1)} - g_{ij}^{(m)}|$. Дополнительно число итераций было ограничено сверху 50, в среднем же процесс сходился за 30 итераций.

Итак, получены оценки плотности на участках покоя и движения, которые будут использоваться для нахождения моментов разладки. Следуя соотношению (1), вычисляются значения T_n . За искомый момент разладки примем момент первого пересечения статистики T_n с нулем, если идти с правого конца (рис. 10).

На рис. 11 показан исходный сигнал с расставленными опорными точками (обозначены сплошными вертикальными линиями).

Проверим корректность нового метода. Для этого сравним результаты его работы с данными, полученными методом пороговой обработки оконной дисперсии, который был внедрен МЭГ-центром в исследования в составе специального программного комплекса. Его полное описание можно найти в [1].

Метод, основанный на CUSUM-статистиках, находит точку привязки ближе к всплеску, чем метод пороговой обработки (рис. 12). Это может быть связано с тем, что последний обрабатывает сигнал окнами.

На рис. 13 приведены сравнительные результаты усреднения магнитоэнцефалограммы по 200 эпохам относительно найденных опорных точек для обоих методов (сигнал при пороговой обработке опережает сигнал, обработанный методом CUSUM-статистики). Как видно, они очень похожи и оба алгоритма уловили отклик на движение на магнитометре. Также можно отметить,

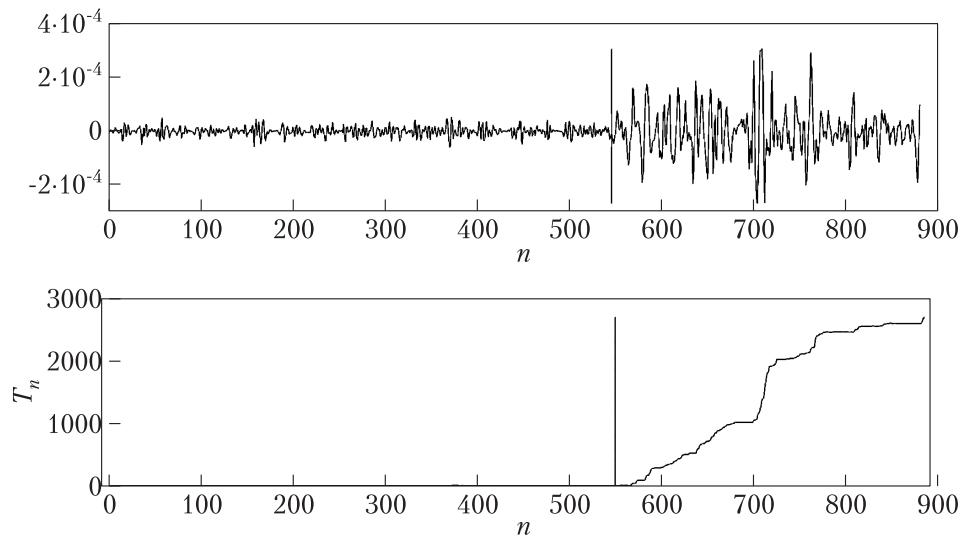


Рис. 10 Поиск момента разладки: приращения миограммы и график статистики T_n

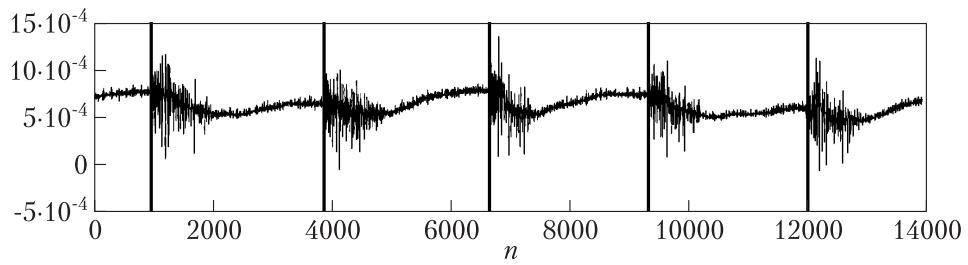


Рис. 11 Миограмма с найденными точками привязки

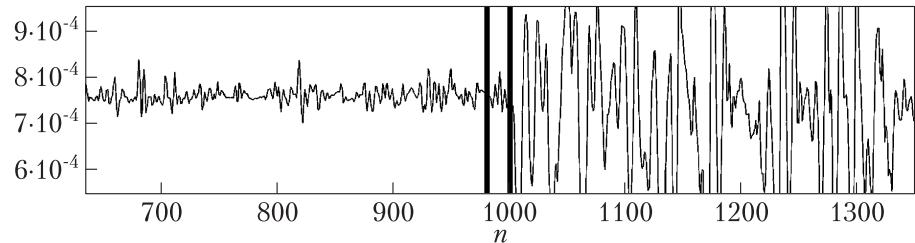


Рис. 12 Сравнительный анализ: точки привязки

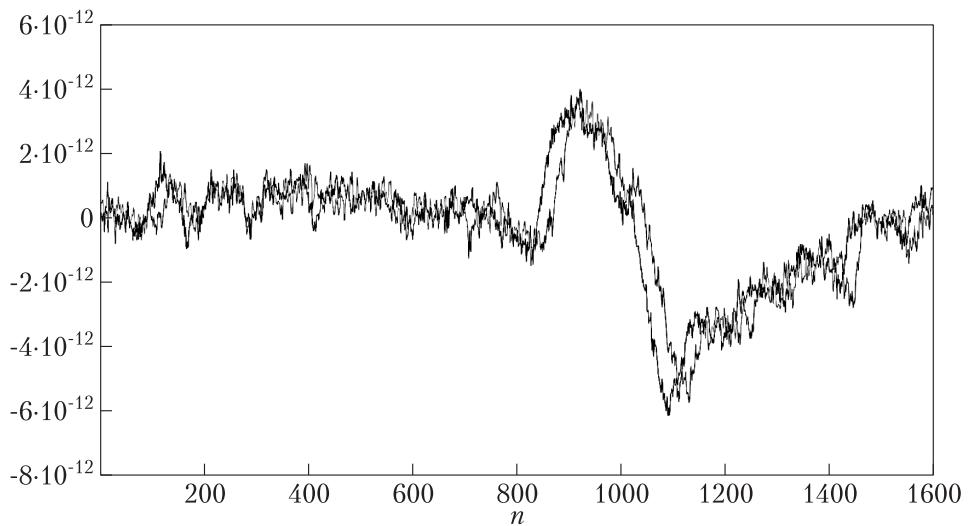


Рис. 13 Сравнительный анализ: усредненный МЭГ-сигнал

что амплитуда сигнала после усреднения уменьшилась примерно в 4 раза (ср. с рис. 1).

5 Выводы

В данной работе рассматривалась задача расстановки опорных точек по сигналу миограммы, играющая важную роль в локализации первичной моторной коры головного мозга. Была показана нестационарность шума миограммы на различных эпохах. В качестве математической модели шума миограммы было предложено использовать конечные сдвиг-масштабные смеси нормальных распределений. Задача разделения смесей была решена с помощью стохастического ЕМ-алгоритма, и рассчитанные плотности были использованы для нахождения точек привязки на основе CUSUM-статистик. Также был проведен сравнительный анализ нового алгоритма с методом, основанным на пороговой обработке оконной дисперсии миограммы, и показана схожесть получаемых ими результатов, что говорит об их корректности.

Использование модели смеси вероятностных законов может оказаться удобным инструментом для дальнейших теоретических исследований в важных областях современной медицины.

Литература

1. Захарова Т. В., Никифоров С. Ю., Гончаренко М. Б., Драницына М. А., Клинов Г. А., Хазиахметов М. Ш., Чаянов Н. В. Методы обработки сигналов для

- локализации невосполнимых областей головного мозга // Системы и средства информатики, 2012. Т. 22. № 2. С. 157–176.
2. Захарова Т. В., Гончаренко М. Б., Никифоров С. Ю. Метод решения обратной задачи магнитоэнцефалографии, основанный на кластеризации поверхности мозга // Статистические методы оценивания и проверки гипотез: Межвузовский сб. научных тр. — Пермь: ПГНИУ, 2013. Т. 25. С. 120–125.
 3. Ширяев А. Н. Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений. — М.: ФМОП, МЦНМО, 2011. 144 с.
 4. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. — М.: Физматлит, 2006. 806 с.
 5. Королев В. Ю. EM-алгоритм, его модификации и их применение к задаче разделения смесей вероятностных распределений: Теоретический обзор. — М.: ИПИ РАН, 2007. 94 с.

Поступила в редакцию 26.05.16

MIXTURES OF NORMAL DISTRIBUTIONS IN THE PROBLEM OF REFERENCE POINTS SEARCH USING MYOGRAMS

T. V. Zakharova^{1,2} and M. M. Podlesnyy¹

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: The paper is devoted to investigation of myogram probability characteristics. This signal represents a record of electrical activity produced by skeletal muscles. It is widely used in medical research, including the determination of reference points in the problem of localization of functional brain areas. The authors propose to take finite scale-location mixtures of normal distributions as a mathematical model of myogram noise. Separation of mixtures is solved by the stochastic EM (expectation–maximization) algorithm and obtained data are used to reveal start points for movements using CUSUM statistics. Finally, the authors compare the new algorithm with the method based on window variance thresholding, which is already used in the MEG center.

Keywords: myogram; mixtures of probability distributions; stochastic EM algorithm; CUSUM statistics

DOI: 10.14357/08696527160308

Acknowledgments

The research was supported by the Russian Science Foundation (project 14-11-00364).

References

1. Zakharova, T. V., S. Yu. Nikiforov, M. B. Goncharenko, M. A. Dranitsyna, G. A. Klimov, M. Sh. Khaziakhmetov, and N. V. Chayanov. 2012. Metody obrabotki signalov dlya lokalizatsii nevospolnimykh oblastey golovnogo mozga [Signal processing techniques for the localization of brain regions irreplaceable]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 22(2):157–175.
2. Zakharova, T. V., M. B. Goncharenko, and S. Yu. Nikiforov. 2013. Metod resheniya obratnoy zadachi magnitoentsefalografi, osnovannyy na klasterizatsii poverkhnosti mozga [Inverse problem solving method based on clustering of brain surface]. *Statisticheskie metody otsenivaniya i proverki gipotez: Mezhvuzovskiy sb. nauchnykh tr.* [Statistical methods for estimating and hypothesis testing. Interuniversity collection of research papers]. Perm: Perm State University Publishing House. 120–125.
3. Shiryaev, A. N. 2011. *Veroятностно-статистические методы в теории принятия решений* [Probabilistic and statistical methods in decision theory]. Moscow: FMOP, MCNMO. 144 p.
4. Kobzar', A. I. 2006. *Prikladnaya matematicheskaya statistika: dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics: For engineers and scientists]. Moscow: Fizmatlit. 806 p.
5. Korolev, V. Yu. 2007. *EM-algoritm, ego modifikatsii i ikh primenenie k zadache razdeleniya smesey veroyatnostnykh raspredeleniy. Teoreticheskiy obzor* [EM algorithm modifications and their application to the separation of mixtures of probability distributions. Theoretical review]. Moscow: IPI RAN. 94 p.

Received May 26, 2016

Contributors

Zakharova Tatiana V. (b. 1962) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, assistant 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; 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; lsa@cs.msu.ru

Podlesnyy Matvey M. (b. 1994) — student, 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; lsa@cs.msu.ru

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

А. А. Зацаринный¹, Ю. С. Ионенков²

Аннотация: Статья посвящена вопросам оценки эффективности автоматизированных информационных систем (АИС) с учетом специфики различных стадий жизненного цикла. Рассмотрены наиболее известные методы оценки эффективности АИС, отмечены их преимущества и недостатки. Представлены рекомендации по выбору показателей эффективности АИС, в том числе применительно к различным стадиям их жизненного цикла. Предложен подход к выбору метода оценки эффективности АИС и определены области применения имеющихся методов оценки эффективности применительно к конкретным АИС и условиям их применения. Приведены примеры практического использования разработанных методик оценки эффективности.

Ключевые слова: автоматизированная система; эффективность; показатель; критерий; альтернатива; своевременность; достоверность; полнота информации; иерархия

DOI: 10.14357/08696527160309

1 Введение

Для современного развития нашего общества характерна постоянно ускоряющаяся динамика роста числа разрабатываемых и внедряемых АИС. При этом все чаще обсуждаются вопросы эффективности применения этих АИС с позиций вклада в повышение эффективности функционирования соответствующей организационной системы (министерства, ведомства, корпоративной структуры, бизнес-компании и т. п.) [1].

Вместе с тем эффективность применения АИС на стадии эксплуатации во многом зависит от качества реализованных в них системотехнических решений, а также организационно-технических мероприятий по обеспечению функционирования этих АИС. Поэтому оценка эффективности является актуальной на всех стадиях жизненного цикла АИС — от формирования замысла их создания до обеспечения эксплуатации.

Таким образом, весьма актуальной задачей является создание методологической базы количественной оценки эффективности АИС. Определенные попыт-

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

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

ки создания этой методологической базы, включая соответствующие критерии и показатели, предприняты в публикациях [2–6]. Целью настоящей статьи является сравнительный анализ наиболее известных методов оценки эффективности и формирование рекомендаций по применению методического аппарата оценки эффективности на различных стадиях жизненного цикла АИС.

2 Анализ известных методов оценки эффективности

Необходимо отметить, что современные АИС описываются множеством показателей системного и технического характера, отражающих их эффективность (своевременность, достоверность, надежность, пропускная способность, безопасность, стоимость и др.). При этом для разных типов систем степень важности каждого из указанных показателей различна.

Количественная оценка эффективности систем должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- достаточно полно характеризовать систему;
- обладать необходимой гибкостью и универсальностью;
- отличаться простотой вычисления и использования.

При этом эффективность должна оцениваться на всех этапах жизненного цикла систем: при формировании требований к системе; в ходе разработки системы; в процессе ее эксплуатации.

Существуют два подхода к оценке эффективности — это однокритериальная и многокритериальная оценка.

Однокритериальная оценка эффективности приводит к удовлетворительным результатам только в отдельных случаях, когда одна из систем по большинству показателей лучше другой.

При многокритериальной оценке сравнение систем проводится в целом по совокупности показателей. В связи с этим возникает потребность в обобщенной оценке системы в виде одной численной величины, полностью характеризующей ее эффективность.

Наиболее известными методами многокритериальной оценки, применяемыми в существующих методиках [7–12], являются:

- метод среднего взвешенного;
- метод Парето;
- метод последовательных уступок;
- метод анализа иерархий;
- метод анализа среды функционирования (DEA-АСФ).

2.1 Метод среднего взвешенного

При использовании метода среднего взвешенного определяется обобщенный показатель эффективности, который отражает полную совокупность наиболее

важных свойств системы и условий ее применения. Этот показатель определяется на основе частных показателей, которые отражают эффективность выполнения системой отдельных задач.

Наиболее часто для определения обобщенного показателя эффективности используется оценка, основанная на аддитивной либо мультипликативной свертке частных показателей системы [7, 8]:

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i \text{ или } \Theta = \prod_{i=1}^n w_i^{\alpha_i},$$

где n — число выбранных показателей системы; α_i — весовые коэффициенты, $\sum \alpha_i = 1$; w_i — нормированные показатели системы.

Таким образом, при использовании данного метода выявляются существенные показатели, производится их суммирование либо умножение с учетом важности (веса), и полученный результат по каждой системе служит основанием для заключения о предпочтительности.

Величина весовых коэффициентов обычно определяется на основе экспериментального опроса специалистов непосредственно либо с помощью специальной процедуры, называемой «метод парных сравнений». При этом оценки по каждому показателю переводятся в относительную форму путем нормирования к сумме оценок по всем показателям. Таким образом, весовые коэффициенты получают значения в пределах от 0 до 1.

К достоинствам данного метода относят простоту формализации, ясный физический смысл, учет индивидуальных представлений лица, принимающего решение, о задаче при назначении весовых коэффициентов. Вместе с тем он 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.

2.2 Метод Парето

Критерий оптимальности Парето применяется при решении таких задач, когда оптимизация означает улучшение одних показателей при условии, чтобы другие не ухудшались.

В данном методе используется понятие доминирования. Первая альтернатива доминирует над второй, если она по всем показателям не уступает второй, а хотя бы по одному из них лучше. При использовании данного метода, рассматривая все множество альтернатив, отбрасывают те из них, над которыми доминирует хотя бы одна альтернатива. Полученное множество недоминируемых альтернатив называется парето-оптимальным, и именно из него выбирается решение.

В общем случае эффективные решения не эквивалентны друг другу, так что про два оптимальных по Парето решения нельзя сказать, какое из них лучше. Поэтому при решении многокритериальных задач необходимо дополнительное

изучение эффективных решений. Задача выделения множества Парето обычно рассматривается как предварительная. За ней следует наиболее существенный этап принятия решений.

К достоинствам данного метода относят математическую строгость и понятность для пользователя, а также возможность для лица, принимающего решение, сосредоточить внимание на множестве меньшего объема. Недостатком является то, что применимость метода ограничивается множеством с числом элементов не более 7–10.

2.3 Метод последовательных уступок

Суть метода состоит в следующем. Производится ранжирование частных критериев по важности. При этом их упорядочение носит качественный характер. Затем выбирается первый, самый важный показатель и находится оптимальная по нему альтернатива. После чего назначается уступка, т. е. интервал, в котором могут изменяться значения первого показателя.

Потом производится оптимизация по второму показателю. При этом оптимальное значение второго показателя ищется при допустимой уступке первого. Далее определяется уступка по второму показателю и т. д. В качестве оптимальной принимается альтернатива, вычисленная в конце многоэтапной оптимизации.

Достоинством метода последовательных уступок является то, что он легко позволяет контролировать, ценой какой уступки в одном частном критерии приобретается выигрыш в другом частном критерии.

Несмотря на простоту метода, его практическое применение сопряжено со значительными трудностями:

- метод применим для решения лишь тех задач, в которых все частные критерии естественным образом упорядочены по степени важности;
- поскольку взаимосвязь частных критериев обычно неизвестна, изучение их взаимосвязи и назначение величин уступки приходится производить в процессе решения задачи;
- практическая нереализуемость при большом числе показателей.

2.4 Метод анализа иерархий

Достаточно эффективным методом, позволяющим снизить субъективность мнений экспертов, является метод анализа иерархий, предложенный американским ученым Т. Саати [13–15]. 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.

Задача представляется в виде иерархической структуры с несколькими уровнями. Верхний уровень иерархий представляет собой цель исследования. 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.

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.

Определение весов вхождения элементов нижней иерархии в предыдущую производится на основании экспертного оценивания методом попарного сравнения. Для такого сравнения предназначена шкала нечетких определений сравнений [15], представленная в таблице.

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 $a_{ii} = 1 \forall i$.

После того как матрица заполнена, находится собственный вектор этой матрицы, соответствующий максимальному собственному значению. Нормированные компоненты этого вектора и будут равны вкладам компонентов нижнего уровня в верхний.

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 (нечеткими) степенями

После того как получены все весовые коэффициенты для всех компонентов каждого уровня иерархии, производится расчет, позволяющий последовательно получить вклад компонентов нижних уровней в общую цель. Компонент низшего уровня, имеющий наибольший вклад, является решением проблемы выбора.

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.

2.5 Метод анализа среды функционирования

Метод Data Envelopment Analysis (DEA), общепринятое русскоязычное название — анализ среды функционирования (АСФ), — методология сравнительного анализа деятельности сложных систем. Метод DEA-АСФ основан на построении так называемой границы эффективности. Эта граница имеет форму выпуклой оболочки [16] или выпуклого конуса в пространстве входных и выходных переменных, описывающих каждый объект. Как это следует из названия метода, граница эффективности как бы огибает, или обертывает, точки, соответствующие исследуемым объектам в многомерном пространстве (enveloping — обертывание). Граница эффективности используется в качестве эталона («точки отсчета») для получения численного значения оценки эффективности каждого из объектов в исследуемой совокупности. Степень эффективности объектов определяется степенью их близости к границе эффективности в многомерном пространстве входов / выходов. Способ построения границы эффективности — многократное решение задачи линейного программирования.

Граница эффективности — понятие условное. Ее вершинами являются эффективные точки в пространстве входов / выходов. Полученная граница эффективности является кусочно-линейной детерминистской. Метод DEA-АСФ в своей традиционной форме позволяет получить показатель только относительной эффективности объектов, поскольку они оцениваются друг относительно друга.

Одной из особенностей метода является его высокая трудоемкость. Другая особенность метода — его зависимость от так называемых «выбросов» в данных. Эта зависимость объясняется тем, что объект, у которого значение одной из выходных переменных оказывается максимальным среди всех оцениваемых объектов, автоматически классифицируется как эффективный объект. Аналогичный эффект имеет место и в том случае, когда у некоего объекта значение одной из входных переменных оказывается минимальным среди всех оцениваемых объектов. Поэтому используются соответствующие способы выявления «выбросов».

3 Рекомендации по применению методического аппарата оценки эффективности на различных стадиях жизненного цикла автоматизированной информационной системы

Представляет интерес рассмотрение особенностей применения методического аппарата оценки эффективности АИС применительно к трем стадиям жизненного цикла:

- (1) формирование требований к системе и замысла ее создания;
- (2) разработка АИС;
- (3) эксплуатация системы.

Для каждой из этих стадий характерны отличия в целях оценки эффективности, составе выбираемого набора показателей эффективности (частных и обобщенных) и используемых методических подходах.

На стадии **формирования требований** к системе целью оценки эффективности является степень соответствия предъявляемых к системе требований, с одной стороны, организационно-техническому замыслу системы в рамках соответствующей организационной системы, а с другой — соответствия современному уровню развития информационных систем и технологий. Эта работа проводится либо научными подразделениями заказчика, либо научно-исследовательской организацией (НИО) заказчика. При этом надо основываться на опыте использования АИС предыдущего поколения, АИС аналогичного назначения других организационных структур, а также зарубежных АИС подобного назначения.

Одной из важных задач является выбор и обоснование номенклатуры показателей системы с точки зрения их влияния на эффективность решения стоящих перед системой задач. Выбираемый набор показателей должен быть минимально достаточным для оценки эффективности системы и при этом должен обеспечивать условия этой оценки с наибольшей простотой. Номенклатура показателей эффективности должна быть настроена на обобщенную оценку эффективности системы относительно ее аналогов-предшественников и позволять оценивать соответствие системы мировому уровню. К числу учитываемых показателей могут быть отнесены состав функциональных задач, предоставляемых сервисов, гибкость, устойчивость, достоверность, пропускная способность, безопасность и др. Важнейшей задачей на данном этапе является проведение технико-экономической оценки, т. е. выбор наиболее экономически эффективного варианта создания АИС, в том числе и с учетом временных показателей.

На стадии **разработки системы** оценка эффективности производится с целью проверки качества предлагаемых к реализации системотехнических решений, а также выбора наиболее целесообразного варианта построения системы для достижения характеристик, определенных требованиями тактико-технического задания. Оценка проводится разработчиком системы на разных стадиях ее разработки, в первую очередь на этапах эскизного и технического проектирования. Целесообразно, чтобы методикой владел и заказчик (НИО) заказчи-

ка), что позволяет обеспечить квалифицированное сопровождение проекта со стороны заказчика и осуществлять осознанный анализ предлагаемых разработчиком функциональных постановок, технических, технологических и других решений.

В этом случае используется более широкий набор показателей эффективности, чем на стадии формирования требований. Должны учитываться показатели, характеризующие все наиболее существенные свойства системы: ее развитие (уровень автоматизации функций, доля автоматизированного взаимодействия элементов системы и т. п.), технические (надежность, пропускная способность, характеристики комплексов технических средств и т. п.), технологические (применение технологий, полнота контроля элементов и т. п.), эксплуатационные (энергообеспечение, эргономика и т. п.), конструктивные (массогабаритные показатели, исполнение), организационные (численность обслуживающего персонала, его подготовка), экономические (стоимость оборудования и программного обеспечения, эксплуатационные затраты и т. п.) характеристики, а также показатели информационной безопасности (вероятность несанкционированного доступа, вероятность навязывания ложных сообщений и т. п.).

В ходе **эксплуатации системы** оценка эффективности проводится для тестирования качества ее функционирования, анализа ее характеристик в различных условиях и выработка соответствующих рекомендаций по обеспечению требуемых условий функционирования, в том числе и для обоснования необходимости модернизации системы. Оценка проводится пользователем (тем, кто применяет АИС по назначению) и штатным подразделением эксплуатации либо организацией, обеспечивающей сопровождение системы.

При выборе набора показателей эффективности на этой стадии целесообразно в первую очередь учитывать показатели, характеризующие функциональные возможности системы, ее техническое состояние, условия ее эксплуатации (эргономика, подготовка помещений и т. п.), качество технической документации, уровень систем технического обслуживания и ремонта, наличие систем диагностики и мониторинга, а также человеческий фактор, включая подготовку обслуживающего персонала, его профессионализм, действия в различных ситуациях.

Таким образом, на каждой из стадий жизненного цикла системы целесообразно выбирать набор показателей эффективности, наиболее соответствующий цели ее оценки. При этом в общем случае могут использоваться одни и те же методики.

В целом, говоря о выборе показателей, необходимо отметить, что ряд показателей систем (своевременность, пропускная способность и т. п.) являются реальными параметрами, имеющими размерность и поддающимися измерению. Такие показатели подлежат нормированию. Другие показатели носят безразмерный характер, отражают степень выполнения конкретных требований и определяются либо как отношение достигнутого показателя к требуемому, либо экспертным путем.

Одним из важнейших аспектов оценки эффективности является выбор метода оценки. При выборе конкретного метода оценки эффективности систем целесообразно учитывать следующие факторы:

- универсальность метода;
- сложность метода;
- специфику исходных данных.

Универсальность метода предполагает возможность его использования для различных задач, например:

- формирование требований, предъявляемых к создаваемой системе;
- анализ системотехнического облика системы на соответствие заданным требованиям при ее разработке;
- анализ действующих систем на стадиях опытной и постоянной эксплуатации;
- сравнение различных систем.

Сложность метода характеризуется сложностью применяемого математического аппарата, временными затратами на обработку исходных данных и получение результатов.

Учет специфики исходных данных предусматривает возможность применения лексических (качественных) исходных данных, а также работу в условиях неопределенности исходной информации, связанной с неполнотой сведений эксперта о свойствах объекта оценки.

Исходя из особенностей наиболее распространенных методов оценки эффективности, представленных в разд. 2, наибольшее применение нашли методы среднего взвешенного, анализа иерархий и анализа среды функционирования.

В ряде работ ФИЦ ИУ РАН для оценки эффективности действующих и создаваемых АИС используются методики, основанные на применении методов среднего взвешенного и анализа иерархий.

В частности, для оценки эффективности ведомственной системы ситуационных центров в рамках ее сопровождения применяется методика на основе метода среднего взвешенного [2]. В ней использован принцип комплексности оценки, заключающийся в том, что эффективность функционирования ситуационного центра определяется показателями эффективности его компонентов: функционального, технологического, технического, эксплуатационного и организационного. На основе оценки эффективности ситуационных центров по данной методике разрабатываются рекомендации по совершенствованию системы их эксплуатации, использованию аппаратных и программных средств, подготовке обслуживающего персонала и т. п.

Для оценки эффективности системы распределенных ситуационных центров (СРСЦ) органов государственной власти использована методика на основе метода анализа иерархий [6]. Предложены частные и обобщенные показатели эффективности. Результаты расчетов по данной методике показывают, что проведение

опытно-конструкторских работ по развитию и совершенствованию СРСЦ позволяет повысить эффективность ее функционирования на 25%–30% за счет создания однородной программно-аппаратной среды на единых технических решениях.

Сравнивая две данные методики, можно отметить, что обе методики являются универсальными, вторая методика более сложная, но она обеспечивает работу с качественными исходными данными и в условиях неполноты информации. Поэтому методика на основе среднего взвешенного используется для оценки эффективности однотипных ситуационных центров в составе систем специального назначения, а методика на основе метода анализа иерархий применяется для оценки эффективности более сложной системы с разнотипными элементами.

4 Заключение

Качество функционирования АИС определяется научной обоснованностью предъявляемых к ним требований и их точной реализацией на всех стадиях жизненного цикла систем, что предполагает развитие соответствующего методического аппарата.

В статье проведена сравнительная оценка наиболее известных методов оценки эффективности АИС, отмечены их преимущества и недостатки, а также области применения. Представлены рекомендации по выбору показателей эффективности АИС, в том числе применительно к различным стадиям их жизненного цикла.

Предложены основные критерии для выбора метода оценки эффективности АИС и определены области применения имеющихся методов оценки эффективности применительно к конкретным АИС и условиям их применения. Приведены примеры практического использования разработанных методик оценки эффективности.

Литература

1. Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. 232 с.
2. 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.
3. 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. научно-практич. конф. — СПб.: СПбГТУ, 2013. Т. 2. С. 37–39.
4. 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.

5. *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.
6. *Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С.* К вопросу оценки эффективности автоматизированных систем с использованием метода анализа иерархий // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 162–179.
7. *Саркисян С. А., Голованов Л. В.* Прогнозирование развития больших систем. — М.: Статистика, 1975. 192 с.
8. *Окунев Ю. Б., Плотников В. Г.* Принципы системного подхода к проектированию в технике связи. — М.: Связь, 1976. 183 с.
9. *Антамошкин А. Н., Моргунова О. Н., Моргунов Е. П.* Методика исследования эффективности сложных иерархических систем // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета, 2006. Вып. 2(9). С. 9–13.
10. *Сафонов В. В., Веденников Ю. В.* Научно-методический аппарат векторной оптимизации систем контроля и управления сложными динамическими объектами при разнородных исходных данных // Информационные технологии. Приложение, 2007. № 11. С. 2–32.
11. *Михайлов Ю. Б.* К вопросу количественной оценки эффективности информационно-управляющих систем различного назначения // Информатизация и связь, 2010. № 2. С. 132–137.
12. *Андреева Т. В., Чулков В. А.* Оценка эффективности научно-исследовательской и инновационной деятельности студентов вуза на основе метода анализа иерархий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. Т. 16. № 4(2). С. 424–431.
13. *Saaty T., Kerns K.* Аналитическое планирование. Организация систем / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1991. 224 с. (*Saaty T., Kerns K.* Analytical planning: The organization of systems. — Oxford: Pergamon Press, 1985. 208 p.)
14. *Saaty T.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1993. 278 с. (*Saaty T.* Decision making for leaders: The analytical hierarchy process for decisions in a complex world. — Belmont, CA, USA: Lifetime Learning Publications, Wadsworth, Inc., 1982. 291 p.)
15. *Saaty T.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети / Пер. с англ. — М.: ЛКИ, 2008. 360 с. (*Saaty T.* Decision making with dependence and feedback: The analytic network process. — Pittsburgh, PA, USA: RWS Publications, 1996. 370 p.)
16. *Сухарев А. Г., Тимохов А. В., Федоров В. В.* Курс методов оптимизации. — 2-е изд. — М.: Физматлит, 2005. 368 с.

Поступила в редакцию 03.08.16

ON ASPECTS OF AUTOMATED INFORMATION SYSTEM EFFICIENCY EVALUATION AT DIFFERENT STAGES OF LIFECYCLE

A. A. Zatsarinny and Y. S. Ionenkov

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences 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 at different stages of the lifecycle. The most famous methods of automated information systems (AIS) efficiency evaluation are considered and their benefits and limitations are shown. The recommendations to AIS efficiency parameters selection at different stages of the lifecycle are presented. The authors suggest an approach to choose the AIS efficiency evaluation method. The areas and conditions of current efficiency evaluation methods applications for certain AIS are determined as well. The practical use of the developed efficiency evaluation techniques is shown.

Keywords: automated system; efficiency; index; criteria; alternative; timeliness; reliability; information completeness; hierarchy

DOI: 10.14357/08696527160309

References

1. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Shabanov. 2015. *Tekhnologiya informatsionnoy podderzhki deyatel'nosti organizatsionnykh sistem na osnove situatsionnykh tsentrov* [A technology of information support of organizational systems activity based on situational centers]. Moscow. TORUS PRESS. 232 p.
2. Zatsarinnyy, 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.
3. Zatsarinnyy, A. A., Y. S. Ionenkov, and A. P. Shabanov. 2013. Metodicheskiy podkhod k otsenke effektivnosti situatsionnykh tsentrov [Methodical approach to assessing the effectiveness of situational centers]. *15th Scientific-Practical Conference (International) “Fundamental and Applied Research, Development and Application of High Technologies in Industry and Economy” Collection of Papers*. St. Petersburg: Polytechnic University Publs. 2(1):37–39.
4. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Shabanov. 2013. Sistemnye aspekty effektivnosti situatsionnykh tsentrov [System aspects of effectiveness of situational centers]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta imeni S. Ju. Vitte. Ser. 1: Ekonomika i upravlenie* [Herald of S. Witte Moscow University. Ser. 1: Economy and Management] 2:110–123.
5. Zatsarinnyy, 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. Ju. Vitte. Ser. 1: Ekonomika i upravlenie* [Herald of S. Witte Moscow University. Ser. 1: Economy and Management] 3:43–53.
6. Zatsarinnyy, A. A., and Y. S. Ionenkov. 2015. K voprosu otsenki effektivnosti avtomatizirovannykh sistem s ispol'zovaniem metoda analiza ierarkhiy [Regarding automated systems efficiency evalution using analytic hierarchy process]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):161–176.
 7. Sarkisyan, S. A., and L. V. Golovanov. 1975. *Prognozirovaniye razvitiya bol'shikh sistem* [Forecasting the development of large systems]. M.: Statistics Publs. 192 p.
 8. 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.
 9. Antamoshkin, A. N., O. N. Morganova, and E. P. Morganov. 2006. Metodika issledovaniya effektivnosti slozhnykh ierarkhicheskikh sistem [A technique of efficiency investigation of complex hierarchy systems]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [A Herald of Siberian State Aerocosmic University]. 2(9):9–13.
 10. Safronov, V. V., and Y. V. Vedernikov. 2007. Nauchno-metodicheskiy apparat vektornoy optimizatsii sistem kontrolya i upravleniya slozhnymi dinamicheskimi ob'ektami pri raznorodnykh iskhodnykh dannykh [Science and methodical tools of vector optimization of management systems and control of complex and dynamic objects in conditions of heterogeneous primary data]. *Prilozhenie k zhurnalu "Informatsionnye tekhnologii"* [Annex to Information Technologies J.] 11:2:32.
 11. Mihaylov, Y. B. 2010. K voprosu kolichestvennoy otsenki effektivnosti informatsionno-upravlyayushchikh sistem razlichnogo naznacheniya [Regarding efficiency evaluation of information and management system of different purposes]. *Informatizatsiya i svyaz'* [Information and Communication] 2:132–137.
 12. Andreeva, T. V., and V. A. Chulkov. 2014. Otsenka effektivnosti nauchno-issledovatel'skoy i innovatsionnoy deyatelnosti studentov vuza na osnove metoda analiza ierarkhiy [Efficiency evaluation of science investigation and innovation of university students' activity based on on analytic hierarchy process]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [News of Science Center of Samara of RAS] 16(4(2)):424–431.
 13. Saati, T., and K. Kerns. 1985. *Analytical planning: The organization of systems*. Oxford: Pergamon Press. 208 p.
 14. Saati, T. 1982. *Decision making for leaders: The analytical hierarchy process for decisions in a complex world*. Belmont, CA: Lifetime Learning Publications, Wadsworth, Inc. 291 p.
 15. Saati, T. 1996. *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process*. Pittsburgh, PA: RWS Publications. 370 p.
 16. Sukharev, A. G., A. V. Timokhov, and V. V. Fedorov. 2005. *Kurs metodov optimizatsii* [A course of optimization methods]. 2nd ed. Moscow: Fizmatlit. 368 p.

Received August 3, 2016

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

СЕГМЕНТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА ПО ПРИЗНАКУ КОНТУРОВ БЕЗОПАСНОСТИ*

A. A. Зацаринный¹, B. И. Королёв²

Аннотация: В статье ситуационный центр (СЦ) представлен как ключевая система информационной инфраструктуры критически важных объектов (КВО). На основании этого формулируются принципиальные положения, которыми следует руководствоваться при решении проблемы информационной безопасности (ИБ) СЦ. Обосновано, что одной из базовых функций информационно-технологической (ИТ) инфраструктуры СЦ является формирование и ведение информационных ресурсов (ИР). В этом смысле СЦ рассматривается как накопительная информационная система с различными источниками информации и формами ее представления. Показано, что в этом случае наиболее очевидным решением бесконфликтного первичного ввода данных в пределы периметра СЦ для их дальнейшей обработки является выделение контуров безопасности обработки. Предложена реализация данной архитектуры, позволившая для обеспечения ИБ использовать сертифицированные наложенные и встроенные средства защиты информации.

Ключевые слова: критически важные объекты; ситуационный центр; информационные ресурсы; информационно-технологическая инфраструктура; информационная безопасность; наложенные и встроенные средства защиты

DOI: 10.14357/08696527160310

1 Ситуационный центр — ключевая система информационной инфраструктуры критически важных объектов

Ситуационный центр является информационно-управляющей системой, которая концентрирует информацию об объекте управления из различных источников своего медиапространства и обеспечивает ситуационное управление объектом, принятие управленческих решений с широким использованием информацион-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 15-29-07981 офи-м).

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

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, vkorolev@ipiran.ru

но-коммуникационных технологий (ИКТ), моделей и методов ситуационного анализа [1].

Создание СЦ и реализация ситуационного управления наиболее востребованы и эффективны, когда объектами управления являются большие и сложные объекты, по своей природе являющиеся социотехническими системами. К системам такого рода следует отнести, прежде всего, муниципальные, региональные и федеральные территориальные образования с соответствующими государственными органами, обеспечивающими жизнедеятельность населения и государственное управление [1]. Кроме того, это органы управления правоохранительными структурами, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, предприятия финансово-кредитной и банковской деятельности, организации управления добычей и транспортировкой нефти, нефтепродуктов и газа, управления транспортом, потенциально опасными объектами. Очевидно, что подобного рода объекты существенно влияют на национальную безопасность и гражданскую жизнедеятельность, поэтому в соответствии с государственными нормативными документами относятся ко КВО [2].

Ситуационные центры служат инструментом информационно-аналитического обеспечения организационного управления КВО в целях принятия оптимальных и безопасных решений для производственных, технологических и управленийких процессов, делового менеджмента в целом. Некачественное информационно-аналитическое обеспечение, неадекватность моделей и сценариев принятия решений могут повлечь за собой значительные, а в некоторых случаях чрезвычайно разрушительные последствия.

Место и значимость СЦ в информационной инфраструктуре КВО обосновывают их отнесение к *ключевым системам информационной инфраструктуры* (КСИИ), входящим в критическую информационную инфраструктуру Российской Федерации [2]. Этот вывод соответствует утвержденной Указом Президента РФ от 31.12.2015 № 683 «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» [3], в которой в качестве информационной базы реализации определена федеральная **информационная система стратегического планирования**, включающая в себя в числе базовых компонентов *системы распределенных ситуационных центров*.

В ходе проектирования СЦ должен рассматриваться как ключевая система ИТ-инфраструктуры КВО.

Ситуационные центры являются объектами информационной деятельности с отчетливо выраженной спецификой. Они должны обеспечивать безопасное агрегирование получаемых из различных источников больших объемов различной информации и ее информационно-аналитическую обработку средствами *собственной инфраструктуры*. В СЦ стекается и в его медиапространстве представляется информация, разнородная не только по своей сути и форме (документы, потоковые данные, телеметрия, видеоданные и пр.), но и по уровню ограничения доступа (грифу). Часто субъекты владения этой информацией не входят в сферу компетенции управления со стороны КВО, информационно и тех-

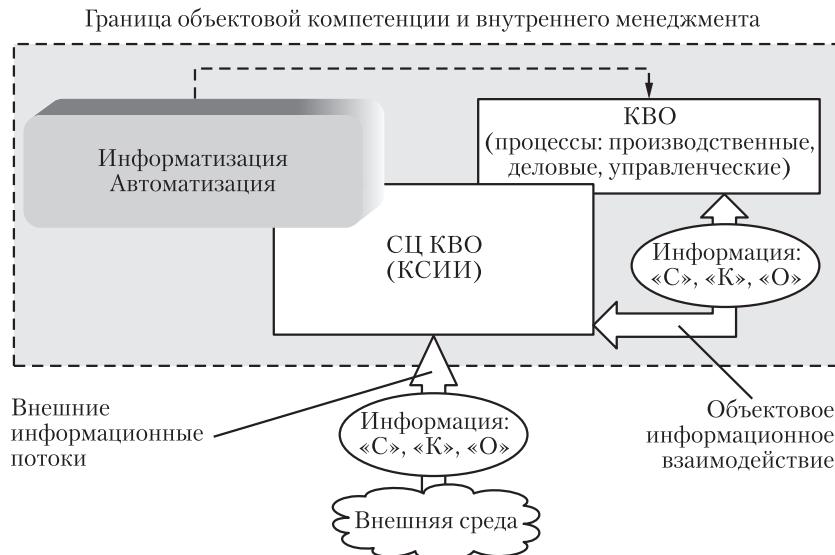


Рис. 1 Ситуационный центр — ключевая система информационной инфраструктуры КВО: «С» — секретная информация; «К» — конфиденциальная информация; «О» — открытая информация

нологически взаимодействуют с ним в соответствии с принятыми договорными отношениями.

Общее отражение данного подхода к СЦ предложено на рис. 1.

Рассмотренные предпосылки и практика работы с автоматизированными информационными системами (АИС) в защищенном исполнении позволяют сформулировать ряд принципиальных выводов по ИБ:

1. Отнесение СЦ к критическим системам информационной инфраструктуры КВО обоснованно отражает их сущность и является важным фактором при выборе подходов к проектированию систем защиты информации (СЗИ) СЦ, так как позволяет использовать нормативную базу по ИБ для КСИИ [4–7]. Это обеспечивает подготовку более доказательной для заказчика базы по требованиям к ИБ.
2. Требования к защищаемым ресурсам СЦ должны формироваться по наивысшему грифу обрабатываемой информации.
3. Реализуемая модель управления доступом к ресурсам должна учитывать фактическую разнородность информации по способу ее представления и по грифу, соответствовать соглашениям по доступу и использованию информации, принятым совместно с поставщиками. В то же время она должна обеспечивать минимизацию рисков КВО при функционировании СЦ. Сред-

ства реализации модели должны быть адекватными возможным угрозам нарушения этой политики.

4. Адекватность средств реализации СЗИ СЦ заключается в безусловной функциональной реализации модели управления доступом и доверенности средств, что означает определенную степень гарантированной надежности в части выполнения средствами своих функций по ИБ. Иначе говоря, средства должны быть обязательно сертифицированы в системе отечественной сертификации средств защиты информации.
5. Разнородное представление информации в медиапространстве СЦ, способы ее хранения, передачи и отображения при реализации моделей, сценарии ситуационного управления требуют соответствующих средств обеспечения защиты информации. Наряду с логическими моделями разграничения доступа в информационно-телекоммуникационной среде, существенно возрастает роль средств защиты информации от утечки и несанкционированного воздействия на нее по техническим каналам.

2 Сегментирование ресурсов ситуационных центров как способ обеспечения информационной безопасности

Базовой реализацией функцией ИТ-инфраструктуры СЦ является формирование и ведение ИР: сбор, обработка, анализ, обобщение и отображение данных в базах данных (БД) применительно к циклу «событие–ситуация–угроза», интеграция и предоставление данных для решения функциональных задач, управление внутренними и внешними информационными потоками и т. д. [1]. По своему характеру данная функция является основой накопительных информационных систем.

Одним из доверенных механизмов защиты накопительных информационных систем с большими объемами разнородной поступающей информации является *сегментирование защищаемых ресурсов* (информационных, программно-технической среды) по признаку выделения контуров безопасности ИТ-инфраструктуры в соответствии с грифом обрабатываемой информации [8].

Как правило, сам СЦ для принятия решений лицами, принимающими решения (ЛПР), первичные данные не генерирует. Собирая информацию от различных «генераторов» данных, он должен, во-первых, обеспечить защищенность поступающих данных. Во-вторых, обрабатывая информацию, СЦ подготавливает консолидированные целевые информационно-аналитические продукты, информация которых представляет собой исходные данные для моделей или сценариев принятия решений в части деятельности и функционирования самого КВО. Уровень значимости и требования по безопасности для этой информации еще более возрастают. Эти факторы обуславливают отнесение СЦ к наиболее защищаемым объектам информационной инфраструктуры КВО. При этом важная роль отводится собственно «генераторам» данных — это либо АИС КВО,

способные порождать информацию о состоянии объектов мониторинга, интересующую СЦ, либо внешние системы — поставщики информации. Как правило, АИС КВО являются для СЦ наследуемыми системами, требующими доработок в части совместимости. Являясь владельцами этой информации, эти системы определяют ее отнесение к грифу секретности/конфиденциальности, обеспечивают ее представление в форме либо в соответствии с заданием СЦ, либо по стандартам выполняемых АИС функций и решаемых задач.

Такая объективная реальность позволяет сделать вывод: *наиболее очевидным решением бесконфликтного первичного ввода из различных источников данных, отнесенных к разному грифу, в пределы периметра СЦ для их дальнейшей обработки является выделение контуров обработки по грифу.*

Архитектура построения ИТ-инфраструктуры для АИС в защищенном исполнении с выделением контуров безопасности для обработки информации одного грифа имеет как преимущества, так и недостатки. Оценку целесообразно рассматривать в двух аспектах: безопасность — эффективность обеспечения защищенности информации и затраты на ее реализацию, с одной стороны, функциональность — операционная реализуемость и затратность ИТ, комфортность операционного сервиса, с другой стороны. На практике эти аспекты среди соответствующих профильных специалистов имеют тенденцию противопоставления.

Найти оптимальный вариант согласованности возможно, во-первых, путем минимизации рисков и потерь в целом для объекта информатизации (общесистемная задача), во-вторых, интегрируя показатели безопасности и функциональности непосредственно в программно-технической и телекоммуникационной среде уже на этапе создания изделий, продуктов, компонентов (техническая задача). Понимая это, ведущие производители аппаратных платформ, программных продуктов и телекоммуникационного оборудования рассматривают безопасность и функциональность как взаимосвязанные показатели процесса. И в этом случае в программно-технической среде может быть обеспечена виртуальная локализация ресурсов в соответствии с политикой разграничения доступа.

В отечественной практике используемые в массовых разработках системные компоненты программно-технической среды и значительная номенклатура телекоммуникационного оборудования — зарубежного производства, поэтому при решении общесистемной задачи минимизации рисков и потерь для объекта информатизации возникает непростая проблема доверенной среды и сертификации средств защиты. Суть ее в том, что при проектировании конкретной АИС высокого уровня защищенности специальными подразделениями необходимо проводить проверку аппаратно-технического оборудования на наличие несанкционированных закладных устройств и оценивать недекларированные возможности программных продуктов и их влияние на систему защиты информации. Проверка программных продуктов требует наличия исходных программных кодов программного обеспечения (ПО) от производителя. Очевидно, что при отечественном производстве аппаратных изделий и программных продуктов ре-

шение этих вопросов перемещается из этапа проектирования конкретных АИС в специальную область отечественной сертификации.

Сложившаяся ситуация заставляет разработчиков АИС искать такие проектные и технические решения, при которых для обеспечения ИБ возможно и достаточно использовать наложенные отечественные сертифицированные средства защиты информации. Одним из таких решений архитектурного характера является сегментирование защищаемых ресурсов по признаку грифа обрабатываемой информации с выделением контуров безопасности.

3 Архитектура и реализация сегментирования защищаемых ресурсов

Институт проблем информатики Российской академии наук имеет большой опыт проектирования АИС и СЦ с архитектурой сегментирования защищаемых ресурсов для государственных структур управления, специальных органов и служб.

Общая идеология такой архитектуры включает в себя следующие положения.

Создаются три ИТ контура безопасности — секретный «С», конфиденциальный «К» и открытый (публичный) «О». Это обеспечивает баланс требований открытости информации и ее защиты.

При реализации соответствующих мер защиты в контурах безопасности может циркулировать и обрабатываться информация следующих категорий:

- публичный контур «О» — только открытая информация;
- конфиденциальный контур «К» — информация ограниченного доступа в соответствии с законодательно установленными тайнами (служебная, коммерческая, банковская и т. д.) и открытая информация;
- секретный контур «С» — информация, включающая сведения государственной тайны, а также информация ограниченного доступа и открытая информация.

Каждый контур безопасности является локальной системой обработки информации. В ней независимо от фактической категории входящих информационных объектов и массивов данных вся информация обрабатывается в соответствии с требованиями по наивысшему грифу.

В целях обеспечения возможности интеграции информации, получения консолидированного информационно-аналитического продукта между контурами работают односторонние каналы информационных потоков по вектору: контур «О» → контур «К» → контур «С».

Обмен информацией с сетью Интернет осуществляется только из публичного контура «О» посредством прямой связи из «демилитаризованной зоны» (ДМЗ), взаимодействующей с рабочей областью контура через межсетевой экран (МСЭ).

Обмен информацией в контурах, между контурами и с системами за пределами медиапространства СЦ осуществляется посредством защищенной телекоммуни-

кационной сети (ТКС), реализующей доверенные каналы связи и функционирующей как самостоятельная система или «поверх» Интернета.

Для всего сообщества пользователей СЦ выделение контуров автоматически обеспечивает реализацию мандатной модели разграничения доступа к ресурсам по признаку грифа секретности / конфиденциальности. Внутри контуров может быть дифференцированное разграничение доступа к ресурсам по дискреционной модели. Это позволяет построить достаточно гибкую и отвечающую принятым нормативным требованиям политику разграничения доступа. При этом возникает непростая проблема функционально-целевой интеграции информации из всей совокупности ИР СЦ.

Прежде всего она касается сбора и накопления информации различного грифа из различных источников, формирования стационарного актуализируемого банка данных СЦ, включающего совокупные ИР центра. Каждый контур безопасности включает свой банк данных. При этом не исключается избыточность данных в контуре по отношению к другому контуру. Все зависит от решаемых задач ситуационного управления и требуемой для этого информации.

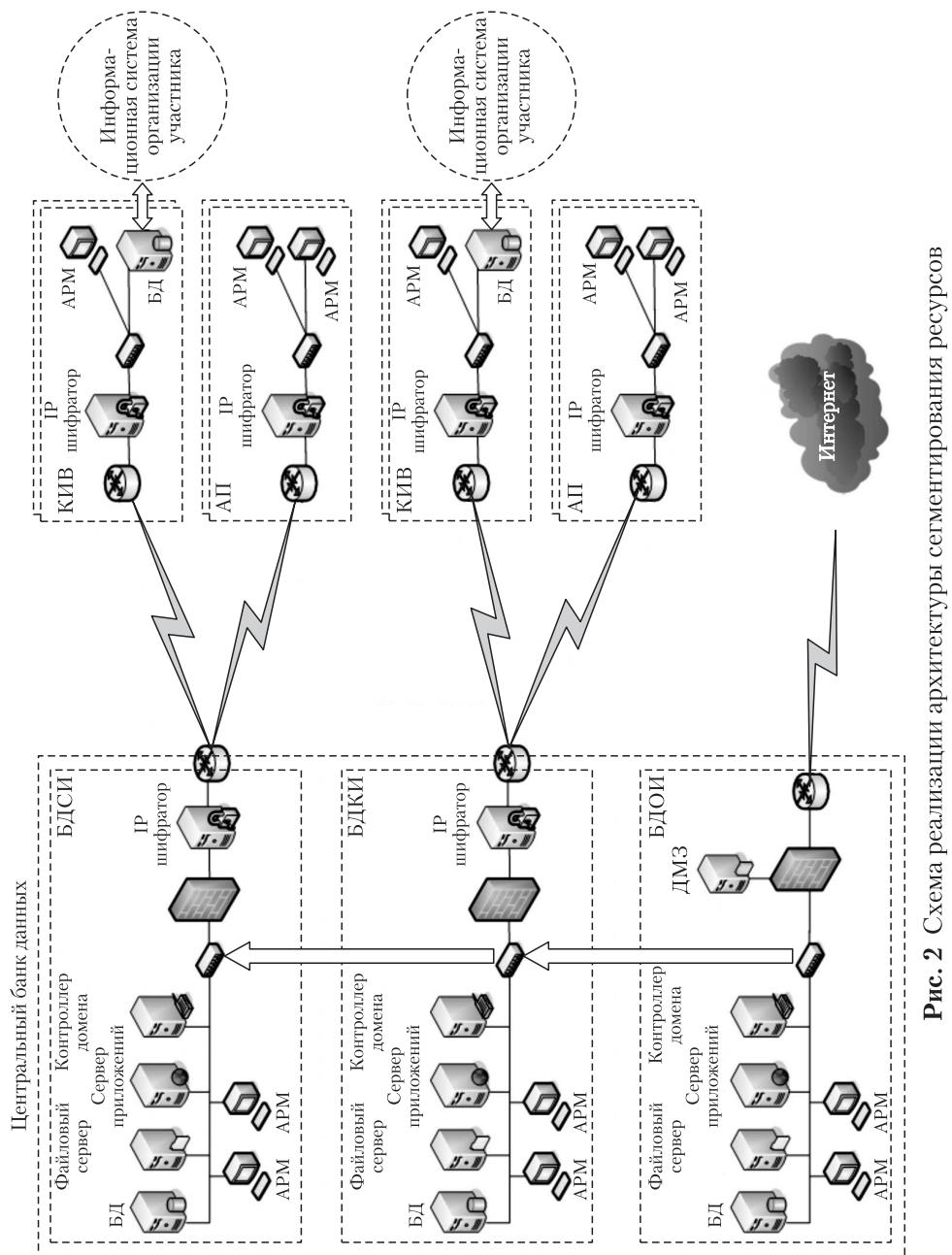
Разрабатываются специальные информационные технологии для подготовки информационно-аналитического продукта по конкретной динамически возникающей ситуации с получением данных из БД СЦ, АИС КВО, а также из систем и объектов, находящихся вне периметра компетенции прямого менеджмента СЦ. Простейший способ ввода актуальных данных в пределы периметра СЦ — размещение на его территории или на специальных выделенных подконтрольных территориях стороннего объекта удаленных терминалов, входящих в соответствующий контур безопасности СЦ.

В качестве примера технического решения на рис. 2 предложена обобщенная схема реально внедренного объединенного банка данных (ОБД), предназначенного для интеграции информации из различных источников и использования этой информации для принятия решений участниками информационного объединения и компетентными органами [9].

Центральный банк данных (ЦБД) включает в себя три контура безопасности: банк данных секретной информации (БДСИ), банк данных конфиденциальной информации (БДКИ) и банк данных открытой информации (БДОИ).

Каждый контур безопасности ЦБД является локальной вычислительной сетью (ЛВС) клиент-серверной архитектуры и организован как выделенный домен информационного взаимодействия. Сервер-контроллер домена реализует политику разграничения доступа к ресурсам.

Используются два вида удаленных терминалов: абонентские пункты (АП) с автоматизированными рабочими местами (АРМ) и комплексы информационного взаимодействия (КИВ), включающие в себя наряду с АРМ серверы БД взаимодействия, предназначенные для реализации протоколов информационного взаимодействия участников с АИС. Абонентские пункты и КИВ организованы как ЛВС. Передача данных между ЛВС каждого контура безопасности (ЦБД ↔ АП, ЦБД ↔ КИВ) обеспечивается защищенными фрагментами ТКС.



Работа с Интернетом осуществляется только из контура безопасности «О», в котором выделяются два сегмента: рабочий и ДМЗ. Демилитаризованная зона включает веб-сервер, почтовый сервер и АРМы. Подключается к рабочему сегменту через МСЭ, что позволяет отделить внутренние ресурсы контура от ресурсов, работающих непосредственно с сетью Интернет, и предотвратить сетевые атаки на внутренние ресурсы.

Для реализации политики безопасности при подключении ЦБД к ТКС для информационного взаимодействия с участниками через КИВ и АП используются МСЭ. Защита информации в каналах передачи данных осуществляется с помощью IP-шифраторов, сертифицированных на соответствующий уровень конфиденциальности.

В каждом контуре безопасности ЦБД все устройства оснащены аппаратно-программными модулями доверенной загрузки (АПМДЗ), обеспечивающими аутентификацию, разграничение доступа и ряд других функций защиты в зависимости от вида применяемого замка.

Для АРМ средствами системы обеспечения доверенной среды (СОДС) операционной системы создается замкнутая среда, допускающая запуск только назначенных данному АРМ пользовательских приложений. При необходимости шифрования сетевого трафика внутри ЛВС эта функция выполняется также средствами СОДС или АПМДЗ. Централизованное управление профилями пользователей осуществляется средствами контроллера домена и СОДС. Печать в контурах «С» и «К» производится только на принтеры, управляемые контроллером домена. Регистрация действий пользователей и событий безопасности обеспечивается средствами домена, системы управления БД и сервера приложений.

Информационное взаимодействие между контурами осуществляется либо через односторонние фильтры от контура «О» к контуру «К» и далее к контуру «С», либо с помощью отчуждаемых внешних носителей информации.

Предлагаемая техническая реализация полностью соответствует идеологии сегментирования ИТ-инфраструктуры системы путем выделения контуров безопасности по признаку грифа обрабатываемой информации, отвечает требованиям по ИБ для КСИИ, выполняя необходимые функции назначения по ИБ, создавая доверенную среду и используя наложенные сертифицированные средства защиты. На практике она обеспечила функциональность и безопасность как накапливаемая интегрированная БД для различных приложений, в том числе и для СЦ.

Литература

1. Зацаринный А. А., Королёв В. И. Информационная безопасность ситуационных центров // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 1. С. 121–138.
2. Основные направления государственной политики в области обеспечения безопасности автоматизированных систем управления производственными и технологически-

- ми процессами критически важных объектов инфраструктуры Российской Федерации. Утверждены Президентом РФ от 03.02.2012 № 803.
3. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента РФ от 31.12.2015 № 683. Ст. 112.
 4. Базовая модель угроз безопасности информации в ключевых системах информационной инфраструктуры. Утверждена ФСТЭК России 18.05.2007.
 5. Методика определения актуальных угроз безопасности информации в ключевых системах информационной инфраструктуры. Утверждена ФСТЭК России 18.05.2007.
 6. Общие требования по обеспечению безопасности информации в ключевых системах информационной инфраструктуры. Утверждены ФСТЭК России 18.05.2007.
 7. Рекомендации по обеспечению безопасности информации в ключевых системах информационной инфраструктуры. Утверждены ФСТЭК России 18.05.2007.
 8. *Андреев В.* Защита информации в ситуационном центре — ключевые аспекты. Типовые и специальные задачи // CONNECT, 2012. № 5. <http://www.ситцентр.рф/pressa/andreev.pdf>.
 9. *Королёв В. И., Крюков А. А., Родионов Д. Е.* Решение задачи информационной безопасности в Едином банке данных по проблемам борьбы с терроризмом // Системы и средства информатики. Спец. вып.: Системы и средства информатики специального назначения / Отв. ред. И. А. Соколов. — М.: ИПИ РАН, 2007. С. 128–145.

Поступила в редакцию 03.08.16

SEGMENTATION OF INFORMATION-TECHNOLOGY INFRASTRUCTURE OF SITUATIONAL CENTER BY THE LOOP SECURITY ATTRIBUTE

A. A. Zatsarinny¹ and V. I. Korolev^{1,2}

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

²National Research Nuclear University “MEPhI,” 31 Kashirskoye Highway, Moscow 115409, Russian Federation

Abstract: Situational center is shown as the key system of critical important objects of information-technology (IT) infrastructure. Based on this, the article formulates the principal terms that should be used for solution of the situational centers information security problem. It is justified that creation and management of information resources are part of the basic functions of IT-infrastructure of situational center. In this sense, a situational center is regarded as an accumulative information system with different information sources and forms of its information presentation. It is shown that allocation of processing circuits by security classification is one of the simplest ways to make a primary

data input nonconflict in the perimeter of a situational center for their further safe processing. The authors propose an implementation of the architecture where certified superimposed and embedded data protection facilities are used to provide the information security.

Keywords: critical important objects; situational center; information resources; information and technological infrastructure; information security; superimposed and embedded data protection facilities

DOI: 10.14357/08696527160310

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-29-07981 ofi-m).

References

1. Zatsarinny, A. A., and V. I. Korolev. 2016. Informatsionnaya bezopasnost' situatsionnykh tsentrov [Information security of situation center]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Mean of Informatics* 26(1):121–138.
2. Osnovnye napravleniya gosudarstvennoy politiki v oblasti obespecheniya bezopasnosti avtomatizirovannykh sistem upravleniya proizvodstvennymi i tekhnologicheskimi protsessami kriticheskikh vazhnykh ob"ektov infrastruktury Rossiyskoy Federatsii. Utverzhdeniy Prezidentom RF ot 03.02.2012 No. 803 [Main directions of government politics in the field of providing of security of automated control systems of production and technology processes of critical important objects of Russian Federation infrastructure. Approved by the President of Russian Federation at 03.02.2012 No. 803].
3. Strategiya natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii, utverzhdena Uzakom Prezidenta RF ot 31.12.2015 No. 683 [Strategy of national security of the Russian Federation. Approved by the Decree of the Russian President of 31.12.2015 No. 683]. Art. 112.
4. Bazovaya model' ugroz bezopasnosti informatsii v klyuchevykh sistemakh informatsionnoy infrastruktury. Utverzhdena FSTEK Rossii 18.05.2007 [A basic model of information security threats in key systems of information infrastructure. Approved by FSTEC of Russia 18.05.2007].
5. Metodika opredeleniya aktual'nyh ugroz bezopasnosti informatsii v klyuchevykh sistemakh informatsionnoy infrastruktury. Utverzhdena FSTEK Rossii 18.05.2007 [A technique of determination of actual treats of information security in key systems of information infrastructure. Approved by FSTEC of Russia 18.05.2007].
6. Obshchie trebovaniya po obespecheniyu bezopasnosti informatsii v klyuchevykh sistemakh informatsionnoy infrastruktury. Utverzhdeny FSTEK Rossii 18.05.2007 [General requirements to information security in key information infrastructure systems. Approved by FSTEC of Russia 18.05.2007].
7. Rekomendatsii po obespecheniyu bezopasnosti informatsii v klyuchevykh sistemakh informatsionnoy infrastruktury. Utverzhdeny FSTEK Rossii 18.05.2007 [Recommendations to ensure the information security in key information infrastructure systems. Approved by FSTEC of Russia 18.05.2007].

8. Andreyev, V. 2012. Zashchita informatsii v situatsionnom tsentre — klyuchevye aspekty. Tipovye i spetsial'nye zadachi [Information security in the situational center — key aspects. Standard and special tasks] CONNECT 5. Available at: <http://www.ситцентр.рф/pressa/andreev.pdf> (accessed August 15, 2016).
9. Korolev, V. I., A. A. Kryukov, and D. E. Rodionov. 2007. Reshenie zadachi informatsionnoy bezopasnosti v Edinom banke dannykh po problemam bor'by s terrorizmom [A solution of problem of information security in Unified data Bank on terrorism fight problems]. *Sistemy i sredstva informatiki: Spec. vyp. sistemy i sredstva informatiki ipetsialnogo naznacheniya* — Systems and means of informatics. Special issue: Systems and means of informatics of special purposes. Ed. I. A. Sokolov. Moscow: IPI RAN. 128–145.

Received August 3, 2016

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

Korolev Vadim I. (b. 1943) — Doctor of Science in technology, professor; leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333; professor, National Research Nuclear University “MEPhI,” 31 Kashirskoye Highway, Moscow 115409, Russian Federation; VKorolev@ipiran.ru

ТЕХНОЛОГИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ИСТОРИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ

И. М. Адамович¹, О. И. Волков²

Аннотация: Данная статья посвящена дальнейшему развитию технологии автоматизации историко-биографического исследования (ИБИ) в части свободного поиска (СП) — поиска с целью обнаружения полезной для исследования информации, характер которой исследователь не может заранее предугадать и отразить в соответствующем поисковом запросе. Выявлены и проанализированы недостатки такой технологии, основанной на системе автоматического извлечения фактов из текстов «Т-парсер», предложены пути их устранения посредством использования средств поддержки совместной работы исследователей. Исследована возможность использования подхода, основанного на решениях семантической паутины (Semantic Web). Предложена форма представления знаний о предметной области, основанная на семантической сети. Показано преимущество такой формы представления по сравнению с иерархической онтологией, используемой в Semantic Web. Описаны основные понятия и принципы построения новой распределенной технологии поддержки свободного поиска в ИБИ с опорой на Т-парсер с учетом решений Semantic Web. Описана реализация этой технологии. Намечены пути ее дальнейшего развития.

Ключевые слова: историко-биографическое исследование; распределенная технология поддержки свободного поиска; семантическая сеть; автоматическое извлечение фактов; Semantic Web

DOI: 10.14357/08696527160311

1 Введение

В статье [1] описан особый вид поиска при проведении ИБИ — СП, при котором осуществляется просмотр текстов самой разной направленности, потенциально имеющих отношение к теме исследования, с целью обнаружения полезной информации, характер которой исследователь не может заранее предугадать. Обосновано использование систем автоматического извлечения фактов с целью упрощения задачи исследователя за счет возможности быстро ознакомиться с краткой «выжимкой» и по ней уже принять решение о целесообразности чтения всего документа.

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

Описана разработанная специально для целей поддержки СП в ИБИ система «Т-парсер», осуществляющая автоматическое извлечение фактов из текстов на естественном языке (ЕЯ). Описано и обосновано представление историко-биографического факта (ИБФ) как древовидной структуры.

Экспериментальная проверка применимости технологии к текстам исторической направленности выявила ее достаточно высокую эффективность. Но также следует отметить и недостатки предложенного решения:

1. Такая важная составляющая ИБИ, как процедура сопоставления *i*-фактов (фактов, описывающих не реальные объекты, а их информационные образы) [2], вполне может быть автоматизирована [3]. Для автоматизированной процедуры обработки данные должны быть формализованы. Но в описанной технологии наименования узлов иерархии факта зависят только от производа каждого, кто формирует грамматики (наборы правил) для разбора текста и выделения фактов.
2. Многообразие изучаемых аспектов жизни индивидуума, стоящего в центре ИБИ, приводит к огромному числу направлений поиска [4]. Следовательно, число источников, изученных в рамках даже одного исследования, весьма велико, и их обработка одиничным исследователем по причине длительности процедуры парсинга и трудоемкости создания правил невозможна. Отсюда с неизбежностью вытекает необходимость объединения усилий исследователей как в создании правил, так и в обмене текстами и результатами извлечения фактов.

2 Подход, основанный на решениях семантической паутины

Концепция семантической паутины (Semantic Web) заключается в организации такого представления информации в сети, чтобы допускалась не только ее визуализация, но и эффективная автоматическая обработка [5]. Центральным понятием Semantic Web является онтология — модель предметной области, состоящая из множества понятий, множества экземпляров понятий и множества отношений (свойств). Основными языками, с помощью которых описываются онтологии Semantic Web, являются стандартизованные организацией W3C (World Wide Web Consortium) языки RDF (Resource Description Framework) / RDFS (RDF Schema) и OWL (Web Ontology Language) [6].

Но этой концепции присущ ряд существенных недостатков [7], препятствующих как развитию самой Semantic Web, так и затрудняющих ее использования в биографических целях:

- проблема истинности метаданных;
- сложность определения онтологии верхнего уровня (корня иерархии);
- дублирование информации: каждый документ должен быть создан в двух экземплярах — размеченным для чтения людьми, а также в машинно-ориентированном формате.

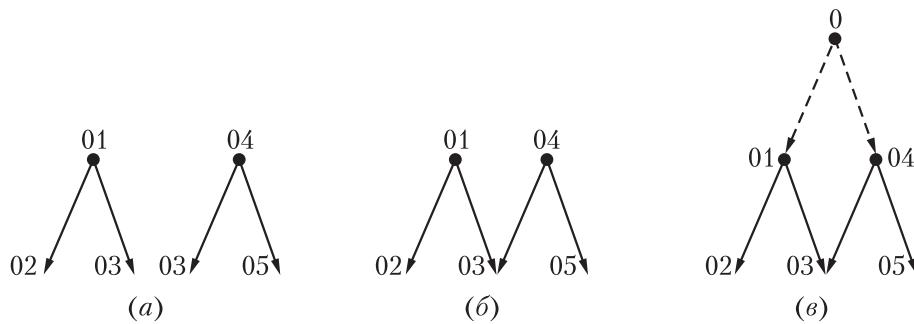


Рис. 1 Объединение двух ИБФ

Для биографической системы данные недостатки являются существенными.

Так, из иерархической структуры ИБФ не вытекает иерархичность их совокупности, как это показано на рис. 1, а и 1, б, и наиболее адекватным способом их представления является сеть. Безусловно, возможно формальное дополнение этой сети до иерархии, как это показано на рис. 1, в, но это потребует создания онтологии верхнего уровня на все случаи жизни, что пока не представляется возможным [8]. К тому же построение универсальной онтологии высокого уровня предполагает наличие единого координационного центра, осуществляющего поддержку ИБИ хотя бы в части унификации понятий. На данном этапе такое требование представляется трудновыполнимым.

Наличие двух экземпляров документа и их раздельное хранение со связкой посредством URI (Uniform Resource Identifier) представляется неудобным для историко-биографических целей. Если концепция Semantic Web предполагает, что ценность представляет только структурированная информация, то для ИБИ внешний вид исходного документа крайне важен. На эту проблему нацелена концепция семантической верстки [9], которая предполагает совмещение визуального представления документа с его семантической разметкой, но, к сожалению, она также не применима к задачам ИБИ, поскольку большинство изучаемых документов уже сформированы. Таким образом, единственным разумным решением для задач ИБИ является хранение текстов и их семантической разметки в одной базе данных (БД).

Проблема истинности и непротиворечивости информации совершенно по-разному оценивается в Semantic Web и ИБИ. В Semantic Web проблема обеспечения целостности и непротиворечивости информации решается средствами [10]:

- анализа не только прямого содержания опубликованных в Сети документов, но и контекста анализируемой информации;
- цифровых подписей для определения источника информации;
- механизмов проверки истинности, позволяющих логически вывести, является ли утверждение правдивым [11].

Таким образом, концепция Semantic Web признает факт существования противоречивой или недостоверной информации, но относится к ней как к злу, от которого следует оградить пользователя либо путем ее автоматизированного выявления и отсечения, либо предоставив ему право самому решать, является ли данная информация достоверной.

Но, как было показано в [2], такой подход совершенно не подходит для ИБИ. Специфика ИБФ состоит в том, что исследователь при проведении ИБИ, как правило, имеет дело не с объективным знанием об объекте исследования, а с его отражением в исторических документах, представленных в *i*-фактах, которые обладают свойством фрагментарности и противоречивости и не существуют в отрыве от своих метаданных, т. е. информации о документе-источнике. Объективное (насколько это вообще возможно в научном исследовании) же знание об объекте исследования (*r*-факты) формируется исследователем в процессе ИБИ путем сопоставления *i*-фактов между собой, а также с ранее выявленными *r*-фактами, относящимися к объекту исследования, и с нормалями [12], с целью взаимоувязывания и разрешения противоречий.

Поскольку предметом исследования является автоматизация выявления *i*-фактов из текстов ЕЯ с целью поддержки СП как составной части ИБИ, следует учитывать, что фрагментарность, недостоверность и противоречивость информации, с которой приходится иметь дело, является ее принципиальным общим свойством.

Таким образом, концепция Semantic Web не в полной мере отражает потребности ИБИ и для этой цели следует выработать самостоятельные решения, опирающиеся как на идеологию Semantic Web, так и на возможности Т-парсера [1].

3 Основные понятия и принципы технологии поддержки свободного поиска в историко-библиографическом исследовании

Основные понятия и принципы построения новой распределенной технологии поддержки СП в ИБИ с опорой на Т-парсер должны строиться с учетом решений Semantic Web и состоят в следующем.

3.1 Указатель фрагмента текста

В технологии Semantic Web для идентификации ресурса используется URI, ориентированный прежде всего на ресурсы сети Интернет. Для задач ИБИ допустим иной способ задания указателя на ресурс.

Ресурсом для СП в ИБИ является фрагмент текста, состоящий из нескольких интервалов. Таким образом, указатель фрагмента текста (УФТ) должен включать идентификатор текста в БД и набор интервалов в тексте. Один из интервалов может быть помечен как главный, иначе главным считается первый интервал.

3.2 Форма представления знаний о предметной области

Многообразие аспектов ИБИ и декларируемая распределенность работы исследователей требуют подхода с опорой на семантическую сеть. Узлы сети представляют собой именованные универсальные классы объектов. Единственным обязательным свойством класса является его имя. Из требования распределенности вытекает, что сеть может создаваться независимо разными исследователями, а поэтому она должна формироваться из автономных именованных подсетей. Для «склейки» этих подсетей между собой предусмотрена связь эквивалентности «узел–узел».

Требование унификации налагает ограничения на многообразие видов связей между классами (узлами). Помимо вышеупомянутой связи эквивалентности предусмотрены связи типа:

- (1) подпонятие (например, «офицер» → «лейтенант»);
- (2) атрибут (например, «персона» → «место рождения»);
- (3) значение (например, «место рождения» → «город»).

Все эти три вида связи являются направленными, поэтому для узлов, соединенных только односторонними связями, можно говорить о том, что один из них «вышележащий», а другой — «нижележащий». Вообще говоря, последовательность связей (траектория) от одного узла к другому не обязана быть единственной, поэтому возникает естественное требование запрета «кольца», т. е. если по одной траектории один узел выше другого, то по другой он не может оказаться ниже.

На рис. 2 приведен фрагмент семантической сети из двух подсетей: ПЕРСОНА и ДУЭЛЬ. Их склейка в единую сеть осуществляется за счет связи

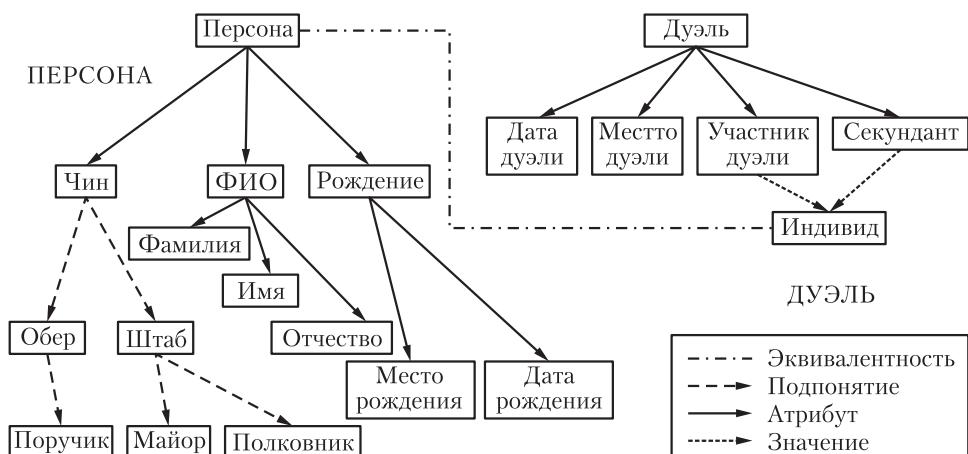


Рис. 2 Фрагмент семантической сети понятий предметной области ИБИ

эквивалентности между узлом «индивиду» одной подсети и узлом «персона» другой подсети. На данном фрагменте представлены все возможные виды связей между узлами.

Каждая связь может иметь признак условности. Условная связь снабжена описанием причин условности.

Также каждая связь типа «атрибут» может иметь признак уникальности значения, необходимый для поиска противоречий в данных. В качестве примера можно привести атрибут «год рождения», который должен быть уникальным, в отличие от атрибута «чин».

Также каждая связь типа «атрибут» может иметь признак наследуемости значения (см. п. 3.3).

Для целей автоматического извлечения фактов из текстов ЕЯ узел может содержать набор шаблонов для распознавания, а также нормализованное значение, которое и будет установлено в результате распознавания.

3.3 Форма представления историко-библиографического факта

Факты задаются значениями экземпляров классов и связями между ними. Связи наследуются из сети классов. Между экземплярами одного класса может быть дополнительно установлена связь эквивалентности. Также может быть добавлена связь нового типа — «часть». Она также является направленной и нужна для наследования атрибутов. Если часть имеет связь «атрибут», то целое имеет такую же связь. А если целое имеет связь «атрибут», то часть имеет такую же связь, но с признаком условности. Понятно, что такие выводы можно сделать не для всех атрибутов. Так, некоторые атрибуты части (например, «размер») не переносимы на целое. Для разделения атрибутов на переносимые и непереносимые и служит признак наследуемости, описанный выше.

Каждый экземпляр имеет значение (которое может быть пустым). Непустое значение имеет либо текстовый комментарий, либо УФТ, связывающий его с документом-источником.

Значение состоит из двух полей: текстового и числового. Числовое значение может представлять собой: целое число, диапазон целых чисел, дату или диапазон дат.

Числовое значение служит для формализации информации, полученной в результате автоматической процедуры, которая выделяет значимые фрагменты текста и назначает их узлам семантической сети в качестве значений, связывая их с исходным документом при помощи УФТ. Исследователь может, интерпретируя текстовые значения, преобразовывать их в числа или даты.

При сравнении значений узлов текстовые поля сравниваются лексикографически, причем только при отсутствии числовых значений. Если числовые значения присутствуют, то сравниваются только они. В случае значения, заданного интервалом, значения будут считаться противоречащими друг другу, если интервалы не пересекаются.

Поскольку узлы ИБФ могут порождаться автоматической процедурой, а сейчас корректность выделения фактов системой Т-парсер составляет около 70% [1], может потребоваться их дальнейшая верификация. Для этого все узлы имеют атрибуты: дата / время создания, создавший их пользователь и признак достоверности. Узлы, порожденные автоматически, изначально не будут иметь этого признака. Пользователь в дальнейшем может установить этот признак вручную. Все связи недостоверного узла считаются условными.

4 Программное обеспечение системы поддержки свободного поиска в историко-библиографическом исследовании

В структуру системы (рис. 3) входят две основные компоненты — серверная и клиентская, взаимодействующие через Интернет. Основой серверной компоненты является программное обеспечение (ПО) управления данными, взаимодействующее с системой управления БД системы.

Тексты ЕЯ хранятся в БД в текстовом формате вместе с набором атрибутов. Атрибутами текста являются название, список авторов, дата создания, дата загрузки, пользователь, аннотация.

Поскольку результаты выделения фактов привязаны к исходным текстам при помощи УФТ, для изменения доступна только аннотация.

Поиск текста (формирование УФТ) осуществляется по тексту и его атрибутам, причем по тексту, названию и аннотации поддерживается полнотекстовый поиск.

Широта временных рамок и многообразие аспектов, по которым ведется ИБИ, неизбежно приведет к росту количества текстовых документов в БД, что в свою очередь потребует использования средств их классификации. Наиболее простым решением представляется классификация тегами, которая допускает классификацию различными пользователями независимо друг от друга.

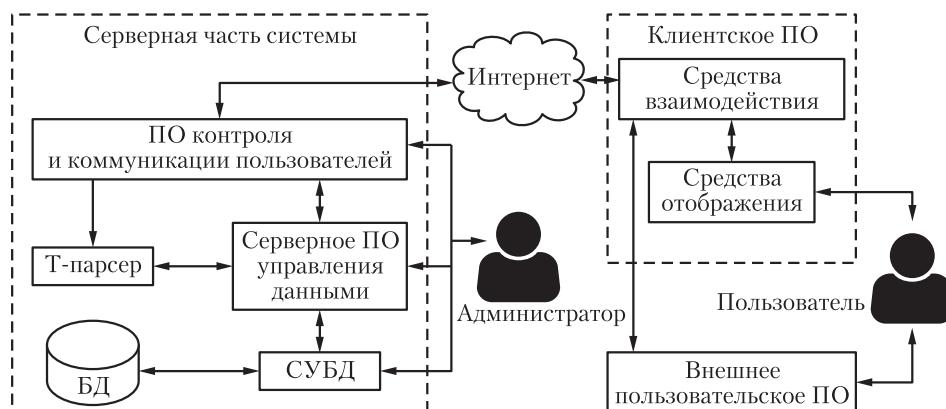


Рис. 3 Схема функционирования системы

В перспективе можно предполагать создание единого центра поддержки деятельности сообществ, осуществляющих ИБИ. В этом случае будет целесообразно перейти на более удобную классификацию посредством «системы иерархических тегов», подробно описанную в [13]. Система иерархических тегов предполагает свободно расширяемый набор понятий, каждое из которых может быть расширено своей иерархической структурой подпонятий.

В части сети классов ПО управления данными выполняет операции создания, изменения и удаления подсетей, классов и их связей с учетом прав доступа, принадлежащих создателю подсети или доверенным пользователям. Поиск подсетей и классов осуществляется по атрибутам и связям.

Узлами ИБФ являются экземпляры классов сети. В части экземпляров ПО управления данными поддерживает операции создания, изменения и удаления экземпляров классов и их связей с контролем корректности операции:

- связи между экземплярами могут либо наследоваться из сети классов, либо дополнительно устанавливаться для двух экземпляров одного класса — связь эквивалентности и связь «часть»;
- признаки уникальности значения и наследуемости значения могут быть установлены только для связи типа «атрибут»;
- признак условности связи не может быть снят, если он был унаследован от условной связи между классами.

При установке УФТ для экземпляра происходит проверка УФТ прочих экземпляров. В случае пересечения УФТ между экземплярами одного класса автоматически устанавливается связь эквивалентности. Данная связь имеет статус автоматической, и в случае изменения УФТ одного из классов так, что их УФТ перестают быть пересекающимися, эта связь удаляется.

Поиск экземпляров производится как по свойствам искомого экземпляра, так и по свойствам связанных с ним (в том числе и через несколько связей) экземпляров. Результатом поиска является список ID экземпляров, каждому из которых соответствует список причин условности (недостоверности) результата. Список может быть пустым. Элементами списка причин условности могут быть узлы и связи в цепочке узлов от искомого до связанного с ним узла, на чьи свойства накладываются условия в поисковом запросе:

- недостоверные (с отсутствующим признаком достоверности) узлы;
- условные (с признаком условности) связи;
- связи «часть–атрибут» при наличии связи «целое–атрибут» с учетом признака наследуемости (см. п. 3.3);
- узел, чье значение проверялось, и диапазон его значений имел пересечение с контрольным диапазоном (см. п. 5).

В перспективе возможно создание механизма поиска «похожих» экземпляров, который позволит упростить решение задачи идентификации персон и т. п. Принцип определения похожести состоит в сравнении значений атрибутов с уч-

том их весовых коэффициентов. Число взвешенных совпадений атрибутов должно определять степень похожести. Весовые коэффициенты должны быть разными на совпадение и на несовпадение атрибутов. Также следует оценивать не только совпадение, но и близость, так как в биографических текстах часто встречаются неточности. Для числовых атрибутов и атрибутов типа «дата» близость оценивается по разности значений. Для оценки близости текстовых атрибутов необходимо применение алгоритмов нечеткого поиска [14], что особенно актуально в связи с часто встречающейся вариативностью написания имен в старинных документах.

В состав клиентской компоненты входят модуль взаимодействия и модуль отображения. Разделение клиентской компоненты на два модуля позволяет подключать к системе внешние пользовательские программы, разработанные специально для сопоставления биографической информации [3].

5 Поисковые запросы

Поисковый запрос состоит из указания класса, экземпляры которого необходимо найти, и условия поиска. Условие поиска представляет собой логическое выражение, использующее скобки и логические операции над элементарными условиями. Элементарное условие состоит из ссылки на экземпляр, связанный с искомым, его свойства, подлежащего проверке, указания типа проверки и контрольного значения (если требуется).

Указание класса, экземпляры которого необходимо найти, задается именем подсети классов и именем класса в подсети, если оно уникально. Если имя искомого класса не уникально в подсети, то класс указывается цепочкой связей от любого класса с уникальным именем. Имя любого класса указывается в квадратных скобках. В цепочке восходящие связи обозначаются символом «<», нисходящие — «>», а связь эквивалентности — «—». Так, если в подсети A есть класс с уникальным именем B и с атрибутом C, чье имя не уникально в подсети A, то класс C можно указать следующей цепочкой: «A : [B] > [C]».

Ссылка на экземпляр, связанный с искомым, задается цепочкой от искомого, где искомый узел обозначается как «[?]». Например, для подсети ПЕРСОНА (см. рис. 2) цепочка «[?]>[фирма]>[отчество]» указывает на узел «отчество» относительно искомого узла «персона».

Свойство, подлежащее проверке, задается служебным словом: class (класс узла), date (дата / время создания), user (пользователь-создатель), veracity (признак достоверности), comment (комментарий), doc (ID связанного по УФТ исходного документа), value (значение).

Запись контрольного значения зависит от его типа. Текстовое контрольное значение записывается в машинописных двойных кавычках в формате регулярного выражения [15]. Дата записывается в апострофах.

Указание типа проверки записывается при помощи служебных слов, относящихся к одной из двух групп:

- (1) проверки наличия и типа значения свойства;
- (2) сравнения с контрольным значением. Если диапазон значений не совпадает, а имеет пересечение с контрольным диапазоном, то результат проверки считается положительным, но не достоверным.

6 Автоматическое извлечение фактов из текстов естественного языка

Т-парсер имеет богатые возможности, позволяющие ему разрешать анафорические связи, ассоциировать групповые признаки с каждым элементом группы и т. п. [1]. Но основной принцип его работы заключается в выявлении содержательных фрагментов текста и их атрибуции за счет поиска в тексте шаблонных языковых конструкций, описываемых попозиционно в виде правил.

Для интеграции Т-парсера в состав системы поддержки ИБИ внесены следующие изменения в технологию его работы:

1. Фактообразующие позиции правила ассоциированы с узлами сети классов (т. е. классами).
2. Терминальное правило ассоциировано с классом.
3. Если в качестве позиции правила выступает имя класса, то производится проверка, нет ли в уже частично разобранной фразе позиции с данным типом. Если нет, то в данной позиции последовательно используются все шаблоны из набора шаблонов данного класса и всех его подпонятий. При совпадении значение ассоциируется с узлом, из набора которого был взят шаблон.
4. Разбор начинается с фразы, в которой уже ранее распознанные части заменены на узлы сети экземпляров, связанные с этой фразой через УФТ. В случае, когда УФТ узла содержит более одного интервала, положение узла среди позиций фразы будет определяться главным интервалом УФТ.
5. Поскольку составление набора правил есть трудоемкий итеративный процесс, включающий отладку, результаты разбора попадают в общую БД только по отдельной команде пользователя. До этого момента результаты разбора другим пользователям не видны.
6. Правило может генерировать структуру факта, отличающуюся от структуры сети классов: в ней могут отсутствовать промежуточные узлы. В этом случае в иерархию факта будут автоматически добавлены пустые узлы, дополняющие ее в соответствии с сетью классов. В некоторых случаях добавление узлов в порожденную Т-парсером неполную цепочку может допускать неоднозначность. В этом случае будут сформированы все варианты цепочек, но связи в местах ветвлений будут иметь признак условности.

7 Выводы

Разработана распределенная технология поддержки свободного поиска в ИБИ с опорой на Т-парсер с учетом решений Semantic Web. Технология

рассчитана на широкий круг пользователей и может быть использована для информационной поддержки конкретно-исторических исследований, выполняемых виртуальными сообществами.

Литература

1. Адамович И. М., Волков О. И. Система извлечения биографических фактов из текстов исторической направленности // Системы и средства информатики, 2015. Вып. 25. № 3. С. 235–250.
2. Адамович И. М., Волков О. И. Иерархическая форма представления биографического факта // Системы и средства информатики, 2016. Вып. 26. № 2. С. 147–161.
3. Маркова Н. А. Технология поддержки конкретно-исторических исследований на основе модели фактоподобных высказываний // Программная инженерия, 2015. № 5. С. 43–48.
4. Адамович И. М., Волков О. И. Средства поддержки интернет-поиска при проведении биографических исследований // Системы и средства информатики, 2014. Вып. 24. № 2. С. 178–192.
5. Хорошевский В. Ф. Пространства знаний в сети Интернет и Semantic Web (Часть 1) // Искусственный интеллект и принятие решений, 2008. № 1. С. 80–97.
6. Разин В. В., Тузовский А. Ф. Представление знаний о времени с учетом неопределенности в онтологиях Semantic Web // Доклады ТУСУРа, 2013. № 2(28). С. 157–162.
7. Анатольев А. Г. Развитие веб-технологий: основные тенденции и перспективы: УМК по дисциплине «Веб-программирование» для студентов 3-го курса кафедры АСОИУ ОмГТУ // Учебно-методические материалы для студентов кафедры АСОИУ, 06.08.2013. <http://www.4stud.info/web-programming/lecture9.html>.
8. Соловьев В. Д., Доброе Б. В., Иванов В. В., Лукашевич Н. В. Онтологии и тезаурусы. — Казань, Москва: Казанский государственный университет, МГУ им. М. В. Ломоносова, 2006. 156 с.
9. Мак-Дональд М. HTML5. Недостающее руководство / Пер. с англ. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 480 с. (MacDonald M. HTML5. The missing manual. — O'Reilly Media, 2011. 448 р.)
10. Андон Ф. И., Гришанова И. Ю., Резниченко В. А. Semantic Web как новая модель информационного пространства Интернет // Проблемы программирования, 2008. Спец. вып. № 2-4. С. 417–430.
11. Андреев А. М., Березкин Д. В., Рымарь В. С., Симаков К. В. Использование технологии Semantic Web в системе поиска несоответствий в текстах документов // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Тр. VIII Всеросс. научн. конф. RCDL'2006. — Ярославль: ЯрГУ им. П. Г. Демидова, 2006. С. 263–269.
12. Маркова Н. А. Электронная коллекция биографических фактов // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Тр. XIV Всеросс. научной конф. RCDL'2012. — Переславль-Залесский: Ун-т города Переславля, 2012. С. 287–293.
13. Адамович И. М., Волков О. И., Маркова Н. А. Метод классификации информации на основе иерархических тегов и его реализация на примере семейного архивного фонда // Системы и средства информатики, 2012. Вып. 22. № 2. С. 134–144.

14. Краснощеков Е. Е. Преимущества нечеткого поиска релевантной информации // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: Сб. научных статей междунар. научно-практич. конф. — Новочеркасск, 2005. С. 44–46.
15. Фицджеральд М. Регулярные выражения. Основы / Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2015. 144 с. (Fitzgerald M. Introducing regular expressions. — O'Reilly Media, 2012. 154 p.)

Поступила в редакцию 04.05.16

DISTRIBUTED AUTOMATED TECHNOLOGY OF HISTORICAL TEXTS ANALYSIS

I. M. Adamovich and O. I. Volkov

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

Abstract: The article focuses on the further development of the technology of such part of biographic investigation automation as texts surfing which is searching useful information, the character of which cannot be foreseen and, therefore, the appropriate web search query cannot be formulated. The faults of such technology based on the T-parser automatic facts extraction system are described and analyzed. The ways of its elimination with the aid of researchers' joint work support tools are proposed. The possibility of using Semantic Web decisions for this purpose was analyzed. The domain knowledge representation form based on semantic network is suggested. The advantage of such form over the hierarchical ontology which is used in Semantic Web is demonstrated. The main terms and principles of the new distributed technology of texts surfing in the biographic investigation with the aid of T-parser using some Semantic Web ideas are described. The implementation of the technology is described. The ways of its development are planned.

Keywords: biographic investigation; distributed technology of texts surfing; semantic network; automatic facts extraction; Semantic Web

DOI: 10.14357/08696527160311

References

1. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2015. Sistema izvlecheniya biograficheskikh faktov iz tekstov istoricheskoy napravленности [The system of facts extraction from historical texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki—Systems and Means of Informatics* 2(25):235–250.

2. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2016. Ierarkhicheskaya forma predstavleniya biograficheskogo fakta [Hierarchical format of biohraphical fact]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 2(26):147–161.
3. Markova, N. A. 2015. Tekhnologiya podderzhki konkretno-istoricheskikh issledovaniy na osnove modeli faktopodobnykh vyskazyvaniy [Support technology for specific historical studies on the base of fact-like propositions model]. *Programmnaya Inzheneriya* [Software Engineering] 5:43–48.
4. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2014. Sredstva podderzhki internet-poiska pri provedenii biograficheskikh issledovaniy [The technology of Internet search as a part of biographic investigation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 2(24):178–192.
5. Khoroshevsky, V. F. 2008. Prostranstva znaniy v seti Internet i Semantic Web (Chast' 1) [Knowledge spaces in Internet and Semantic Web (Part 1)]. *Iskusstvennyy Intellekt i Prinyatie Resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making] 1:80–97.
6. Rasin, V. V., and A. F. Tuzovsky. 2013. Predstavlenie znaniy o vremeni s uchetom neopredelennosti v ontologiyakh Semantic Web [Representation of temporal knowledge in Semantic Web ontologies considering knowledge uncertainty]. *Dokl. TUSURa* [TUSUR Proceedings] 2(28):157–162.
7. Anatoliev, A. G. 2013. Razvitiye veb-tehnologiy: Osnovnye tendentsii i perspektivy. UMK po distsipline ‘Veb-programmirovaniye’ dlya studentov 3-go kursa kafedry ASOIU OmGTU [Development of web technology: The main trends and prospects. Teaching materials on the subject ‘Web-programming’ for students of the 3rd year of the ASIPM Department of OmSTU]. *Uchebno-metodicheskie materialy dlya studentov kafedry ASOIU* [The educational materials for the students of ASIPM]. Available at: <http://www.4stud.info/web-programming/lecture9.html> (accessed January 01, 2016).
8. Solovev, V. D., B. V. Dobrov, V. V. Ivanov, and N. V. Lukashevich. 2006. *Ontologii i tezaurusy* [Ontologies and thesaurus]. Kazan, Moscow: Kazan State University, M. V. Lomonosov Moscow State University. 156 p.
9. MacDonald, M. 2011. *HTML5. The missing manual*. O'Reilly Media. 448 p.
10. Andon, P. I., I. Y. Grishanova, and V. A. Reznichenko. 2008. Semantic Web kak novaya model’ informatsionnogo prostranstva Internet [Semantic Web as a new model of Internet information space]. *Problemy Programmirovaniya* [Problems in Programming] Special edition, 2-4:417–430.
11. Andreev, A. M., D. V. Berezkin, V. S. Ryimark, and K. V. Simakov. 2006. Ispol’zovanie tekhnologii Semantic Web v sisteme poiska nesootvetstviy v tekstakh dokumentov [Using Semantic Web technology for the task of inconsistency detection in natural language texts]. *Elektronnnye biblioteki: Perspektivnye metody i tekhnologii, elektronnnye kollektisy: Tr. 8-y Vseross. nauchn. konf. RCDL’2006* [Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections: 8th All-Russian Scientific Conference RCDL’2006 Proceedings]. Yaroslavl: P. G. Demidov Yaroslavl State University. 263–269.
12. Markova, N. A. 2012. Elektronnaya kollektiya biograficheskikh faktov [Digital collection of biographic facts]. *Elektronnnye biblioteki: Perspektivnye metody i tekhnologii, elektronnnye kollektisy: Tr. 14-y Vseross. nauchnoy konf. RCDL’2012* [Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections: 14th All-Russian Scientific Conference RCDL’2012 Proceedings]. Pereslavl-Zalessky. 287–293.

13. Adamovich, I. M., O. I. Volkov, and N. A. Markova. 2012. Metod klassifikatsii informatsii na osnove ierarkhicheskikh tegov i ego realizatsiya na primere semeynogo arkhivnogo fonda [Method of information classification based on hierarchical tags and its implementation on the example of a family archive]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 2(22):134–144.
14. Krasnoshchekov, E. E. 2005. Preimushchestva nechetkogo poiska relevantnoy informatsii [The advantages of fuzzy search for relevant information]. *Scientific and Practical Conference (International) “Computer Technologies in Science, Manufacture, Social and Economic Processes” Proceedings*. Novocherkassk. 44–46.
15. Fitzgerald, M. 2012. *Introducing regular expressions*. O'Reilly Media. 154 p.

Received May 4, 2016

Contributors

Adamovich Igor M. (b. 1934) — Candidate of Science (PhD) in informatics, 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

ИНФОРМАТИКА В АКАДЕМИЧЕСКОЙ БИБЛИОТЕКЕ

C. A. Власова¹, Н. Е. Каленов²

Аннотация: Рассматриваются вопросы применения методов и средств информатики в практике работы академических библиотек по трем направлениям — автоматизация технологических процессов, автоматизация информационно-библиотечного обслуживания пользователей, автоматизация процессов управления. Приведены примеры конкретных технологических и программных решений, разработанных и применяемых в централизованной библиотечной системе, возглавляемой Библиотекой по естественным наукам Российской академии наук (БЕН РАН).

Ключевые слова: информационное обслуживание; автоматизация; сетевые технологии в библиотеках; управление библиотечными ресурсами; интернет-каталоги

DOI: 10.14357/08696527160312

1 Введение

Понятие, вынесенное в заголовок, в течение последних нескольких десятилетий является предметом дискуссий. Согласно одному из подходов [1], «информатика — отрасль науки, изучающая структуру и общие свойства информации, а также вопросы, связанные с ее сбором, хранением, поиском, переработкой, преобразованием, распространением и использованием в различных сферах деятельности». Очевидно, что если под термином «информатика» понимать это определение, то, рассматривая информатику в библиотеке, надо описывать ее деятельность во всех аспектах — это и изучение информационных потребностей пользователей, и процессы приобретения, учета, обработки, хранения литературы на различных носителях, и все формы обслуживания пользователей, и управление библиотечными ресурсами, и т. д. и т. п. Примерно то же относится и к варианту использования понятия «информатика», приведенному в [2]: «Информатика — наука о методах и процессах сбора, хранения, обработки, передачи, анализа и оценки информации, обеспечивающих возможность ее использования для принятия решений».

В данной статье термин «информатика» будет рассматриваться как область научных знаний, связанных с обработкой информации с помощью электронно-вычислительной техники [3, 4].

¹Библиотека по естественным наукам Российской академии наук, svlasova@benran.ru

²Библиотека по естественным наукам Российской академии наук, nek@benran.ru

Вопросы применения средств и методов информатики в библиотеках имеют свою специфику и историю и достаточно широко освещаются в соответствующей узкопрофессиональной печати (журналы «Информационные ресурсы России», «Научно-техническая информация», «Научные и технические библиотеки», «Библиосфера» и др., сборники статей и материалов библиотечных конференций), однако они практически не рассматриваются на страницах журналов, связанных с проблемами информатики. Как следствие, они остаются неизвестными специалистам в области информационных технологий.

В данной статье делается попытка ликвидировать этот пробел и ознакомить читателей журнала с основными задачами, решаемыми в академических библиотеках на базе современных информационных технологий.

Под академическими библиотеками в данном контексте будем понимать библиотеки, входившие до 2013 г. в структуру Российской академии наук, а ныне — в структуру Федерального агентства научных организаций (ФАНО).

Академические библиотеки в своем большинстве объединены в централизованные библиотечные системы (ЦБС) — 4 региональные и 2 отраслевые. К первым относятся ЦБС, возглавляемая Библиотекой Академии наук (БАН) в Санкт-Петербурге (обслуживает научные организации Санкт-Петербургского научного центра РАН), ЦБС Уральского научного центра РАН (возглавляется Центральной научной библиотекой — ЦНБ УрО РАН в Екатеринбурге), ЦБС Сибирского научного центра РАН (возглавляется Государственной публичной научно-технической библиотекой — ГПНТБ СО РАН в Новосибирске), ЦБС Дальневосточного научного центра РАН (возглавляется Центральной научной библиотекой — ЦНБ ДВО РАН во Владивостоке). Отраслевая ЦБС по гуманитарным и общественным наукам возглавляется библиотекой, входящей в состав Института научной информации по общественным наукам (ИНИОН) РАН (ее отделения обслуживают институты Москвы); отраслевая ЦБС по естественным и точным наукам возглавляется БЕН РАН, она включает отделения, обслуживающие научные организации Москвы и подмосковных научных центров.

Центральные академические библиотеки представляют собой достаточно сложные организации, осуществляющие в современных условиях не только и не столько традиционное библиотечное обслуживание, сколько поиск и предоставление пользователям сетевых информационных ресурсов, соответствующих тематике их исследований. В своей деятельности библиотеки реализуют технологические процессы, связанные с анализом информационного рынка, анализом информационных потребностей пользователей, приобретением, регистрацией и распределением среди пользователей разнородных информационных ресурсов, формированием многочисленных видов сопроводительных, учетных и финансовых документов. Стремясь обеспечить максимальную полноту и информативность приобретаемых ресурсов в условиях ограниченных финансовых возможностей, а также их оперативную обработку и предоставление пользователям, центральные библиотеки достаточно давно стали использовать в своей технологии автоматизированные системы (АС).

Первой из академических библиотек активно использовать методы и средства информатики начала БЕН РАН. Ее специалистами в конце 1970-х гг. была разработана АС, пусковой комплекс которой был официально принят в 1980 г. в промышленную эксплуатацию как часть Государственной автоматизированной системы научно-технической информации. Приемка осуществлялась межведомственной комиссией под председательством академика Г. С. Поспелова. Пусковой комплекс был реализован на ЭВМ ЕС-1022, установленной в Библиотеке; он решал 12 задач, направленных на автоматизацию технологических процессов, процессов информационно-библиотечного обслуживания пользователей и процессов управления. Более 35 лет информационные технологии развиваются в БЕН в этих трех направлениях [5]. Их поддержка и развитие обеспечиваются коллективом специалистов Отдела системных исследований и автоматизированных технологий БЕН, разрабатывающим все необходимых прикладные программные средства.

Историю развития средств и методов информатики в применении к информационно-библиотечной технологии можно проследить по публикациям материалов семинара «Информационное обеспечение науки: новые технологии», проводимого БЕН начиная с 1985 г. Эти публикации представлены в сборниках научных статей, электронные версии которых доступны на сайте БЕН РАН по адресу http://www.benran.ru/SEM/Sem3_83.html. Здесь же, перейдя по ссылке «Электронная библиотека», можно осуществить поиск статей по авторам, организациям, году выпуска сборника и словам из заголовок статей.

Рассмотрим основные направления применения средств и методов информатики, специфичные для академических библиотек, не касаясь вопросов автоматизации бухгалтерского и кадрового учета, ничем не отличающихся от решаемых в других организациях.

2 Автоматизация библиотечной технологии

Одной из важнейших задач академических библиотек является оптимальное комплектование — приобретение в рамках имеющихся финансовых средств изданий, обладающих максимальной информативностью для обслуживаемых ими пользователей. Для решения этой задачи в БЕН РАН разработана специальная технология [6, 7]. Она предусматривает создание базы данных (БД), отражающей информационные потребности обслуживаемых БЕН научных организаций (в терминах классификационной системы УДК); информирование пользователей о новых научных изданиях, выходящих в мире; формирование БД экспертных оценок представленных изданий; формирование оптимального заказа на издания для фондов ЦБС БЕН РАН.

Основу информации о вышедших из печати отечественных изданиях составляют получаемые два раза в месяц в электронном виде из Российской книжной палаты (РКП) файлы библиографических описаний, а также поступающие от ряда издательств описания и аннотации планируемых к выпуску изданий. Для

получения информации о новых зарубежных изданиях сотрудники БЕН анализируют сайты ведущих научных издательств мира и импортируют данные изданий, соответствующих тематической направленности ЦБС БЕН РАН. Полученные из разных источников данные преобразуются к единому входному формату и загружаются в «Экспертную систему комплектования», поддерживаемую на сервере БЕН РАН (в процессе загрузки автоматически исключается дублирование записей). С этой информацией знакомятся и оценивают ее по установленной системе авторизованные эксперты — сотрудники научных организаций, официально выделенные их администрацией. Результаты экспертных оценок обрабатываются специальными программами и используются комплектаторами БЕН для принятия решений о заказе конкретных изданий для тех или иных библиотек ЦБС.

Деятельность центральных академических библиотек в части технологии формирования своих фондов представляет собой в определенном смысле «непрерывное» производство. Они ежедневно получают из магазинов, издательств и коллекторов заказанные ими издания (а БАН, БЕН РАН, ГПНТБ СО РАН и ИНИОН в дополнение к этому — обязательный экземпляр из РКП), которые необходимо зарегистрировать, распределить между библиотеками ЦБС, поставить на баланс, обработать «интеллектуально» и технически. Под интеллектуальной обработкой понимаются каталогизация и систематизация (создание справочного аппарата, позволяющего осуществлять поиск издания соответственно по формальным и содержательным признакам); под технической — присвоение изданию инвентарного номера (в соответствии с правилами учета фондов) и «шифра хранения», позволяющего определять физическое местонахождение издания в хранилище библиотеки.

В центральных академических библиотеках перечисленные технологические операции выполняют сотрудники различной квалификации, работающие в различных подразделениях. Соответственно, каждое поступившее в библиотеку издание проходит цикл обработки, называемый «путь книги». Необходимо отметить, что «путь» первого поступившего экземпляра, направляемого на интеллектуальную обработку, отличается от «пути» последующих экземпляров, которые проходят только техническую обработку.

Сквозная автоматизация всех технологических процессов, сопровождающих «путь книги», является одной из основных технологических задач крупной библиотеки. Ее результатом должны быть распечатанные учетно-финансовые документы и все необходимые данные в электронном виде для поиска и идентификации изданий. Эта задача решается с помощью специальных прикладных программных средств. В БЕН РАН это разработанные специалистами Библиотеки с учетом специфических требований к технологии в условиях ЦБС комплексы «Библиобус» для работы с непериодическими изданиями [8] и «Журналы» для работы с периодическими изданиями [9].

Комплекс «Библиобус» обеспечивает формирование заказа на конкретные издания, регистрацию их поступлений, распределение по библиотекам ЦБС,

распечатку всех необходимых приходно-расходных документов, полную обработку изданий, включая сканирование обложек, титульных листов и оглавлений книг, формирование метаданных для работы сводного электронного каталога.

Комплекс «Журналы» обеспечивает автоматизацию подписки на журналы, их регистрацию и распределение между библиотеками ЦБС.

Наряду с автоматизацией процессов, сопровождающих «путь книги», для таких крупных библиотек, как БЕН РАН, важным является технология обработки заказов на материалы, предоставляемые по заказам, поступающим от абонентов системы межбиблиотечного абонемента (МБА). Специфика службы МБА БЕН РАН состоит в том, что она является частично коммерческой, причем для разных категорий абонентов существуют разные расценки на отдельные технологические процессы.

Автоматизированная система МБА, разработанная в БЕН РАН [10], обеспечивает прием заказов непосредственно из сводных интернет-каталогов, представленных на сайте Библиотеки, и автоматизацию всех технологических процессов. Система осуществляет все необходимые финансовые расчеты, предоставляет полную справочно-статистическую информацию о деятельности службы МБА.

3 Автоматизация процессов информационно-библиотечного обслуживания пользователей

Информационно-библиотечное обслуживание применительно к академическим библиотекам включает две составляющие — информирование пользователей об имеющихся и появляющихся в мире документах по тематике их исследований и предоставление собственно документов по запросам пользователей. Традиционно в рамках первого направления академические библиотеки осуществляли (наряду с выполнением разовых запросов на подборку материалов по определенной тематике) выпуск печатных тематических (текущих и ретроспективных) указателей литературы и избирательное распространение информации (ИРИ).

Технология ИРИ ориентируется на обслуживание конкретного коллектива ученых (абонентов), который формулирует запрос, отражающий тематику своих исследований, в виде набора ключевых слов и терминов классификационных систем. Информационные работники, обслуживающие данного абонента, отслеживают появление публикаций, соответствующих его запросу, в доступных им изданиях и передают сведения о них абоненту. При необходимости абонент может заказать копию заинтересовавшей его публикации.

Именно с процессов ИРИ в конце 1970-х гг. началось использование академическими библиотеками вычислительной техники в задачах обслуживания пользователей. Сначала БЕН на полученной в 1978 г. собственной ЭВМ ЕС-1022, затем ГПНТБ СО РАН и БАН на арендуемых ЭВМ внедрили АС ИРИ на основе получаемых из ВИНИТИ магнитных лент [11, 12]. Разработанная в БЕН технология, принятая в начале 1980-х гг. в качестве типовой в масштабах

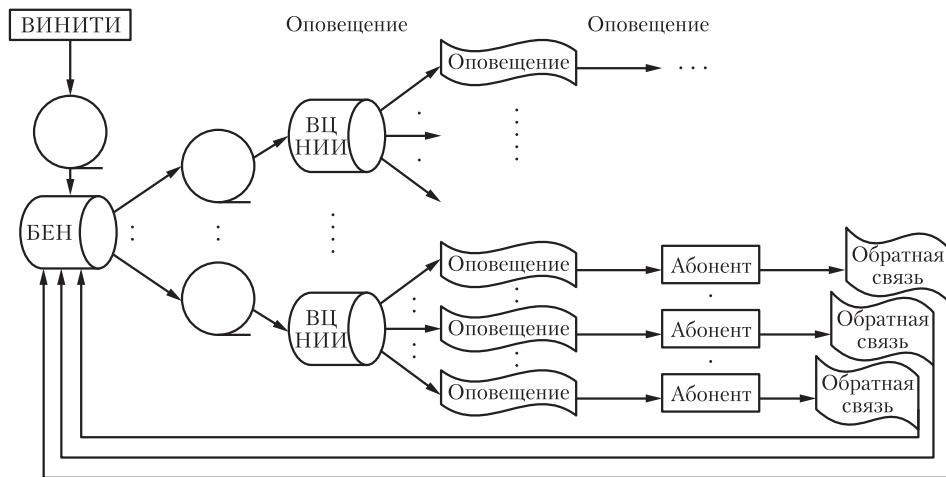


Рис. 1 Блок-схема системы ИРИ на базе магнитных лент ВИНТИ

страны, представляла собой трехуровневую систему с обратной связью и была реализована следующим образом (рис. 1).

Основными звеньями рассматриваемой системы ИРИ наряду с БЕН стали библиотеки и вычислительные центры (ВЦ) обслуживаемых институтов.

На ЭВМ БЕН и ВЦ институтов устанавливалось унифицированное программное обеспечение. В каждом из обслуживаемых институтов выделялись коллективные абоненты (на уровне отдела или лаборатории), сотрудники которых с помощью библиотечных специалистов формулировали тематику своих исследований в терминах рубрикатора ВИНТИ с уточнением ключевыми словами. Каждый запрос вместе с кодом абонента вводился в информационно-поисковую систему (ИПС) на ЭВМ института. На основе отдельных запросов формировался обобщенный запрос института, который передавался в БЕН (либо на магнитной ленте, либо на перфоленте по телетайпу) и вводился в ее ИПС. При поступлении очередного информационного массива ВИНТИ он загружался в ИПС БЕН, из него программным образом отбирались документы, соответствующие обобщенному запросу каждого института, которые передавались на магнитной ленте во внутреннем формате ИПС в ВЦ института. На ЭВМ ВЦ института осуществлялось распределение документов между коллективными абонентами на основе их запросов. Документы либо распечатывались и передавались абонентам, либо загружались в «личный кабинет» абонента, где их можно было просмотреть, используя локальные дисплеи.

В результате абоненты получали регулярно информацию о новых публикациях (включая патенты) по тематике их исследований и могли в рамках «второго контура» в автоматизированном режиме заказать в БЕН и получить через библиотеку своего института копии заинтересовавших их статей.

Автоматизированная система ИРИ была внедрена специалистами БЕН в 36 академических институтах и научных центрах, пользовалась достаточно большой популярностью у сотрудников и просуществовала до момента ликвидации ВЦ в академических институтах. В начале 1990-х гг. система ИРИ была переведена на персональные компьютеры, однако вскоре прекратила свое существование по нескольким причинам, первая из которых была связана с введением ВИНИТИ платы за предоставление информации, а вторая — с открывшейся для библиотек возможностью приобретения зарубежной информации (в частности, Science Citation Index на CD-ROM и Current Contents на дискетах), аналогичной подготавливаемой ВИНИТИ, но несравненно более полной и оперативной.

В отличие от БЕН, отказавшейся от приобретения БД ВИНИТИ в начале 1990-х гг., ГПНТБ СО РАН продолжает получать эти БД и создала на их основе мощную регионально-ведомственную информационную систему, включающую несколько миллионов документов и действующую вплоть до настоящего времени [12, 13].

Необходимо отметить, что работы по развитию современных информационных технологий вплоть до начала 1990-х гг. велись центральными академическими библиотеками в достаточно тесном контакте, что и отразилось в совместных публикациях [14, 15].

С появлением и развитием сетевых технологий изменились подходы библиотек к информационному сопровождению научных исследований.

В середине 1990-х гг. центральные академические библиотеки БЕН РАН, ГПНТБ СО РАН, а несколько позже БАН, ЦНБ УрО РАН [16] и ЦНБ ДВО РАН создали свои интернет-сайты и стали размещать на них разнородные информационные ресурсы, определяемые задачами, стоящими перед ними. В настоящее время все центральные библиотеки представляют на своих сайтах (<http://www.rasl.ru> — БАН, <http://benran.ru> — БЕН, <http://cnb.uran.ru> — ЦНБ УрО РАН, <http://www.spsl.nsc.ru> — ГПНТБ СО РАН, <http://www.cnb.dvo.ru> — ЦНБ ДВО РАН) справочную информацию «о себе» и своих централизованных системах, информацию о своих фондах (каталоги, указатели новых поступлений, списки доступных сетевых ресурсов), сведения о проводимых мероприятиях и т. п.

Принципиально изменились подходы к текущему информационному обслуживанию. Поскольку во много раз сократилось число выписываемых библиотеками печатных экземпляров научных журналов и им на смену пришел сетевой доступ к электронным версиям, традиционная технология ИРИ в значительной степени потеряла смысл. В этих условиях библиотеки переходят на новые формы информационного сервиса.

Так, на сайте БЕН РАН (<http://benran.ru>) поддерживается раздел «Естественные науки в сети Интернет». Он включает 3 подраздела: «Стартовые точки», «Серийные издания» и «Новые книги». Первый из них содержит систему метауказателей по основным направлениям естественных и точных наук. Под метауказателем понимаются комментарии и совокупность ссылок на

указатели ресурсов по данному научному направлению, созданные ведущими специалистами в этой области из разных стран.

Подраздел «Сериальные издания» содержит сгруппированные по тематическим направлениям описания электронных сериальных изданий со ссылками на их издателей и поставщиков. Этот подраздел также постоянно контролируется на актуальность ссылок. Ежемесячно обновляемый раздел «Новые книги» включает тематические списки вышедших в России и за рубежом книг. Физически это информация, загружаемая в экспертную систему комплектования, о которой шла речь выше, но со свободным доступом и другим пользовательским интерфейсом.

На сайтах отделов БЕН РАН, обслуживающих конкретные академические институты и научные центры, поддерживается разнородная информация по тематике их исследований. В качестве примера можно привести наиболее «продвинутый» в этом направлении сайт отдела БЕН РАН в Пущинском научном центре — ПНЦ (<http://cbp.iteb.psn.ru/library/default.html>). На нем поддерживается обширная информация о ресурсах по физико-химической биологии (в том числе библиометрические данные по институтам, входящим в ПНЦ).

Новой формой информационного обслуживания, в некоторой степени заменившей выпуск указателей литературы, является организация на сайте БЕН РАН «виртуальных выставок» материалов, относящихся к заданной тематике. Такие виртуальные выставки формируются по заказам институтов и бывают приурочены к юбилейным датам, конференциям, к открытию новых направлений исследований. Материалы для отражения на них формируются специалистами БЕН РАН совместно с учеными института, заказавшего выставку, на основе анализа сводных каталогов, а также доступных БД. Выставки включают библиографические описания изданий, отсканированные обложки, аннотации и оглавления книг, аннотации и ссылки на полные тексты статей из отечественных и зарубежных журналов. Текущие выставки и их архив представлены на сайте Библиотеки в разделе «Виртуальные выставки / Архив»

Ядром любой библиотеки является совокупность ее каталогов — без них функционирование библиотеки как информационной организации невозможно. С переходом на автоматизированную обработку поступающих изданий академические библиотеки начали создавать электронные каталоги и при появлении технической возможности предоставили их в сетевой доступ, разместив на своих серверах.

Однако подходы к формированию общедоступных интернет-каталогов во многих академических библиотеках остаются теми же, что и для традиционных карточных каталогов. Это создает целый ряд проблем для пользователей, работающих с ними. Так, например, по библиотечным правилам в библиографическом описании фамилия автора издания отделяется от его инициалов запятой, о чем подавляющее большинство пользователей не подозревает. Соответственно, каталоги многих библиотек на запрос по полю автор «Д. К. Фаддеев» или «Фаддеев Д. К.» выдают сообщение, что записей не найдено, хотя в каталоге есть издания данного автора.

Другая крайность — когда интернет-каталог работает полностью аналогично универсальным поисковым машинам и на запрос «Д. К. Фаддеев» выдает документы, где авторами числятся не только все Фаддеевы с любыми инициалами, но женщины с фамилией Фаддеева.

Недостатки интернет-каталогов отечественных библиотек уже неоднократно анализировались [17, 18]. К сожалению, все вышеперечисленные центральные академические библиотеки РАН, за исключением БЕН РАН, приобрели для автоматизации своей технологии программное обеспечение ИРБИС [19], и их каталоги, построенные на его основе, не обеспечивают поиск по фамилии автора с инициалами, по терминам, включающим спецсимволы, выдают значительный шум, вызванный принудительным морфологическим анализом слов, в том числе и фамилий.

По мнению авторов статьи, интернет-каталоги научных библиотек должны: (а) отвечать достаточно жестким требованиям по полноте и точности и (б) обладать «устойчивостью» по отношению к вариантам формулировки запроса.

Первый постулат означает, что электронный каталог должен выдавать **все те и только те записи**, которые соответствуют запросу. Второй постулат означает, что на запросы вида «Д.К.Фаддеев», «Фаддеев Д.К.» и т. п., отличающиеся отсутствием или наличием пробелов между инициалами и(или) фамилией и последовательностью задания инициалов и фамилии, должно выдаваться одинаковое количество записей.

Задача создания интернет-каталога, отвечающего сформулированным постулатам, была поставлена и решена в БЕН РАН в рамках новой версии каталога книг и продолжающихся изданий (<http://www.benran.ru/cbook>). Описание этой версии каталога достаточно подробно представлено в [20]. Сводные электронные каталоги ведутся в БЕН начиная с 1990 г. (по журналам) и с 1993 г. (по книгам).

Для отражения в Интернете изданий прошлых лет академические библиотеки формируют имидж-каталоги путем сканирования карточных каталогов. При этом ЦНБ УрО РАН и ГПНТБ СО РАН пытаются автоматически распознавать тексты карточек, однако огромное количество возникающих при этом ошибок существенно снижает качество поиска в этих каталогах. Это можно проиллюстрировать двумя примерами.

При попытке поиска в имидж-каталоге ГПНТБ СО РАН материалов по слову «Фаддеев», выдается список «терминов» каталога, начинающихся с этого слова (рис. 2), не нуждающийся в комментариях.

Имидж-каталог ЦНБ УрО РАН на запрос «Фаддеев» выдает 47 записей, однако подавляющее большинство из них не имеют отношения к Фаддееву. Среди них преобладают записи типа приведенной на рис. 3.

Имидж-каталоги, сформированные автоматически путем сканирования карточек с последующим распознаванием текста, очевидно, могут быть «вручную» отредактированы, но это (учитывая объемы фондов библиотек) огромная дорогостоящая работа, которая в значительной мере бессмысленна для естественных



Рис. 2 Список «терминов» имидж-кataloga ГПНТБ СО РАН

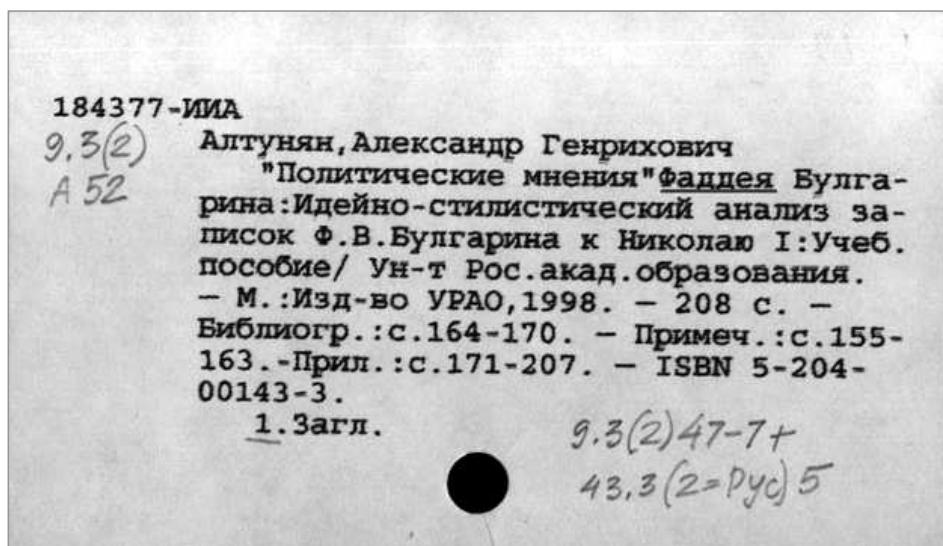


Рис. 3 Один из документов, выданный каталогом ЦНБ УрО РАН на запрос «Фаддеев»

наук, где по большинству научных направлений спрос на издания экспоненциально падает по мере старения литературы начиная с 3–4-летнего возраста.

Исходя из этого БЕН РАН создает имидж-кatalogи, сканируя карточки без их распознавания, и предоставляет пользователям возможность поиска нужных записей по аналогии с традиционными библиотечными карточными каталогами. Подобный систематический каталог отдела БЕН в ПНЦ доступен по адресу <http://194.149.64.126/CRT/Default.aspx>.

Наряду с обслуживанием по МБА (см. выше), БЕН РАН предоставляет читателям возможность работать со своими фондами в читальных залах. Для

повышения уровня обслуживания пользователей специалистами БЕН РАН разработана автоматизированная интернет-система заказа литературы в читальном зале Библиотеки [21]. Ею могут пользоваться как постоянные читатели в режиме удаленного доступа (БД таких читателей включает около 25 тысяч записей), так и читатели, посещающие БЕН РАН в разовом порядке.

4 Автоматизация процессов управления

Как уже указывалось, центральные академические библиотеки представляют собой сложные научно-технологические комплексы, требующие для обеспечения своей деятельности специфических систем управления.

Целевыми функциями этих систем применительно к ЦБС, в частности, являются:

- (1) обеспечение оптимального по полноте и точности комплектования системы в целом;
- (2) обеспечение точности комплектования каждой библиотеки;
- (3) оперативность предоставления ученым информации о поступивших материалах и собственно материалов по их заказам.

Любая система управления базируется на обработке входного потока данных и данных «обратной связи», характеризующих текущее состояние объекта управления.

Обработка входных данных уже была рассмотрена выше (экспертная система комплектования, технологические и обслуживающие программные комплексы).

В качестве «обратной связи» для достижения целевых функций 1 и 2 выступают данные о востребованности пользователями приобретенных ресурсов (печатных и сетевых изданий и БД).

Оперативность предоставления информации пользователям определяется наряду с оперативностью приобретения изданий сроками их обработки в технологических отделах библиотеки, поэтому БЕН РАН уделяет контролю этих сроков большое внимание.

Для многоаспектной обработки данных «обратной связи» всех типов в БЕН РАН разработана и функционирует интернет-ориентированная система обобщенного статистического мониторинга — Monitoring [22, 23]. В этой системе аккумулируются все данные о поступлении в ЦБС БЕН библиотечных материалов и спросе на них со стороны пользователей по всем каналам обслуживания, а также все данные о прохождении технологических этапов в процессе обработки материалов из системы «Библиобус».

С помощью системы Monitoring строятся рейтинговые (по уровню востребованности) списки журналов, оценивается производительность труда и загруженность отдельных сотрудников, контролируются сроки выполнения технологических операций, формируются многоаспектные отчетно-статистические данные.

Одним из направлений управленческой деятельности БЕН РАН является формирование ежегодного развернутого сводного числового отчета о деятельности библиотек, входящих в ее ЦБС. Эти отчеты представляются в вышестоящие организации и содержат более 100 показателей. Для их формирования специалистами БЕН разработана и внедрена специальная система [24], обеспечивающая ввод информации в БД непосредственно из библиотек в сетевом режиме с динамическим контролем корректности ввода и автоматическим подсчетом всех необходимых производных показателей.

5 Перспективы развития

Академические библиотеки постоянно работают над совершенствованием технологии, формированием новых информационных ресурсов, предоставлением новых услуг пользователям. Перспективы развития академических библиотек обусловлены:

- (а) переходом к адресному информированию на основе сетевых технологий групп ученых, занимающихся исследованиями конкретных проблем;
- (б) созданием электронных библиотек — постепенным переводом фондов в цифровую форму (с соблюдением требований российского законодательства);
- (в) формированием проблемно-ориентированных документальных БД по тематике исследований обслуживаемых ими научных коллективов;
- (г) развертыванием библиометрических исследований в интересах обслуживаемых ими научных организаций. В БЕН РАН работы по этим направлениям поддерживаются грантами РФФИ №№ 16-07-00765 и 16-07-00450.

6 Заключение

Академические библиотеки, являясь центрами, осуществляющими информационное обеспечение научных исследований, в современных условиях не могут эффективно решать стоящие перед ними задачи без широкого использования методов и средств информатики. Наиболее развитые в этом отношении библиотеки используют их по всем направлениям своей деятельности, начиная от процессов формирования ресурсов, целенаправленного предоставления их пользователям и кончая задачами управления технологическими процессами.

Особенности информационно-библиотечной технологии, широкий круг задач, возникающих при решении проблем информационного обеспечения научной деятельности, специфичных именно для академических библиотек и возглавляемых ими централизованных библиотечных систем, позволяют говорить о том, что существует отдельное направление развития информатики, которое условно можно назвать «библиотечная информатика».

Это направление, связанное не только с автоматизацией собственно «библиотечной» технологии, но и с созданием принципиально новых «сущностей», в частности электронных библиотек, успешно развивается в центральных академических библиотеках при тесном сотрудничестве с ведущими организациями в области информационных технологий, такими как ИПИ РАН, ВЦ РАН, МСЦ РАН. Такое сотрудничество необходимо развивать, поскольку только совместными усилиями можно создать успешно функционирующую единую систему информационного обеспечения научных организаций, декларируемую ФАНО России [25].

Литература

1. Большой энциклопедический словарь. 2016. <http://www.vedu.ru/bigencdic/24150>.
2. Большая российская энциклопедия. — М.: Большая Российская Энциклопедия, 2008. Т. 11. С. 481–484.
3. *Мизин И. А., Синицын И. Н., Доступов Б. Г., Захаров В. Н., Красавин А. Н.* Развитие определений «Информатика» и «Информационные технологии». — М.: ИПИ АН СССР, 1991. Препринт. 26 с.
4. *Поспелов Д. А., Фет Я. И.* Очерки истории информатики в России. — Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1998. 662 с.
5. *Каленов Н. Е.* Современные информационные технологии в деятельности Библиотеки по естественным наукам РАН // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Информационные технологии, 2014. Т. 12. № 3. С. 57–77.
6. *Власова С. А., Васильчиков В. В., Каленов Н. Е., Левнер М. В.* Использование экспертных оценок для комплектования централизованных библиотечных систем // Научно-техническая информация. Сер. 1, 2007. Т. 5. С. 22–26.
7. *Власова С. А.* Плюсы экспертной системы: действующая версия // Библиотека, 2015. № 3. С. 22–24.
8. *Бочарова Е. Н., Васильев А. В., Кочукова Е. В.* Автоматизация процессов комплектования и обработки литературы на основе информационно-библиотечной системы «Библиобус» // Научные и технические библиотеки, 2012. № 3. С. 30–33.
9. *Погорелко К. П.* Развитие программного комплекса системы учета журнального фонда ЦБС БЕН РАН // Информационное обеспечение науки: новые технологии / Под ред. Н. Е. Каленова, В. А. Цветковой. — М.: БЕН РАН, 2015. С. 244–248.
10. *Власова С. А., Колерова Т. С.* Автоматизация технологических процессов службы межбиблиотечного абонемента БЕН РАН // Вклад информационно-библиотечной системы РАН в развитие отечественного библиотековедения, информатики и книговедения: Юбилейный научный сборник, посвященный 100-летию ИБС РАН. — Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2011. С. 396–402.
11. *Каленов Н. Е., Кажидеева Л. Ф., Верховский С. Я.* Опыт информационного обслуживания ученых АН СССР на базе магнитных лент ВНИТИ // Вопросы информационной теории и практики, 1979. № 38. С. 70–76.
12. *Баженов С. Р., Бобров Л. К., Мазов Н. А.* Создание и использование проблемно-ориентированных баз данных в АСТИ СО РАН // Новые технологии

- в информационно-библиотечном обеспечении научных исследований: Сб. научных трудов. — М., 1992. С. 26–29.
13. Баженов С. Р., Елепов Б. С., Калюжная Т. А., Лаврик О. Л., Павлов А. И., Скарук Г. А., Шабанов А. В. Развитие информационно-библиотечной среды СО РАН в 2007–2009 гг. для обеспечения научных коммуникаций // Библиосфера, 2010. № 3. С. 48–54.
 14. Бобров Л. К., Глушановский А. В., Каленов Н. Е., Капустин В. А. Проблемы автоматизации информационного обслуживания ученых в центральных библиотеках АН СССР // НТИ. Сер. 1, 1985. № 7. С. 11–15.
 15. Баженов С. Р., Бобров Л. К., Елепов Б. С., Каленов Н. Е. Проектирование и эксплуатация региональных АС НТИ. — Новосибирск: Наука, 1991. 174 с.
 16. Треккова П. П., Оганова О. А. Этапы формирования и развития библиотечно-информационной системы Уральского отделения РАН // Библиосфера, 2011. № 3. С. 9–16.
 17. Каленов Н. Е. Электронные каталоги академических библиотек: какими им быть? // Теория и практика общественно-научной информации. — М.: ИНИОН РАН, 2014. Вып. 22. С. 54–63.
 18. Каленов Н. Е. Библиотечные интернет-каталоги и пользователь // Научная периодика: проблемы и решения, 2015. № 6. С. 208–214.
 19. Миронов А. В., Олейник Л. Ю. Автоматизация библиотечных процессов на основе АБИС «ИРБИС 64»: Методические материалы. — Иркутск, 2013. 124 с.
 20. Власова С. А., Каленов Н. Е. Роль каталогов научных библиотек в задачах информационного сопровождения научных исследований // Информационные процессы: Электронный журнал, 2014. Т. 14. № 3. С. 232–241.
 21. Власова С. А. Новая версия системы заказа литературы в читальном зале БЕН РАН // Информационное обеспечение науки: новые технологии. — М., 2015. С. 254–261.
 22. Варакин В. П., Каленов Н. Е. Управление ресурсами централизованной библиотечной системы // Информационные ресурсы России, 2010. № 3(115). С. 2–11.
 23. Варакин В. П., Каленов Н. Е. Реализация многофункциональных штатных запросов для системы статистического мониторинга работы библиотек ЦБС БЕН РАН // Информационные ресурсы России, 2015. № 5(147). С. 9–15.
 24. Варакин В. П., Ивановский А. А. Новая версия автоматизированной системы обработки и анализа данных о деятельности ЦБС БЕН РАН «Библиотеки» // Информационное обеспечение науки: новые технологии. — М.: БЕН РАН, 2015. С. 262–274.
 25. ФАНО России создает систему информационного обеспечения научных организаций. http://fano.gov.ru/press-center/card/?id_4=34626.

Поступила в редакцию 12.02.16

COMPUTER SCIENCE IN THE ACADEMIC LIBRARY

S. A. Vlasova and N. E. Kalenov

Library for Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences, 11/11 Znamenka Str., Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: Specific applications of computer science methods and media developed for the libraries of the Russian Academy of Sciences are considered. There are three directions of information-technology implementation in these libraries — automation of technology processes (acquisition, cataloging, indexing, etc.), network technologies for information and library users services (including interlibrary loan), and automation of management processes (optimization of financing, analysis of the usage of materials, and multifaceted statistical analysis of the libraries activities). Examples of specific technological and software solutions developed and implemented in the centralized library system, headed by the Library for Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences, are described.

Keywords: information services; automation; network technologies in academic libraries; library management; Internet catalogues

DOI: 10.14357/08696527160312

References

1. *Bol'shoy entsiklopedicheskiy slovar'* [Great encyclopedic dictionary]. 2016. Available at: <http://www.vedu.ru/bigencdic/24150/> (accessed March 9, 2016).
2. *Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya* [Great Russian encyclopedia]. 2008. Moscow: Great Russian Encyclopedia. 11:481–484.
3. Mizin, I. A., I. N. Sinitsyn, B. G. Dostupov, V. N. Zakharov, and A. N. Krasavin. 1991. *Razvitiye opredeleniy "Informatika" i "Informatsionnye tekhnologii"* [The development of definitions of "Computer Science" and "Information Technology"]. Moscow: IPI AS USSR. Preprint. 26 p.
4. Pospelov, D. A., and Ya. I. Fet. 1998. *Ocherki istorii informatiki v Rossii* [Essays on the history of informatics in Russia]. Novosibirsk: OIGGM SO RAN. 662 p.
5. Kalenov, N. E. 2014. Sovremennye informatsionnye tekhnologii v deyatel'nosti Biblioteki po estestvennym naukam RAN [Information technologies in the activities of the Library for Natural Sciences RAS]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the Novosibirsk State University. Information technology ser.] 12(3):57–77.
6. Vlasova, S. A., V. V. Vasil'chikov, N. E. Kalenov, and M. V. Levner. 2007. Ispol'zovanie ekspertnykh otsenok dlya komplektovaniya tsentralizovannykh bibliotekhnykh system [The use of expert estimates for completing the centralized library systems]. *Nauchno-tehnicheskaya informatsiya* [Scientific and technological information]. Ser. 1. 5:22–26.
7. Vlasova, S. A. 2015. Plyusy ekspertnoy sistemy: deystvuyushchaya versiya [Advantages of expert system: The current version]. *Biblioteka* [Library] 3:22–24.

8. Bocharova, E. N., A. V. Vasil'ev, and E. V. Kochukova. 2012. Avtomatizatsiya protsessov komplektovaniya i obrabotki literatury na osnove informatsionno-bibliotechnoy sistemy "Bibliobus" [Aquisition and cataloging automation based on the software complex "Bibliobus"]. *Nauchnye i Tekhnicheskie Biblioteki* [Scientific and Technical Libraries] 3:30–33.
9. Pogorelko, K. P. 2015. Razvitie programmnogo kompleksa sistemy ucheta zhurnal'nogo fonda TsBS BEN RAN [Development of the software for CLS LNS RAS journal system]. *Informatsionnoe obespechenie nauki: Novye tekhnologii* [Information providing of science: New technologies]. Moscow: BEN RAN. 244–248.
10. Vlasova, S. A., and T. S. Kolerova. 2011. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov sluzhby mezhbibliotechnogo abonamenta BEN RAN [Automation of interlibrary loan technology in the LNS RAS]. *Vklad informatsionno-bibliotechnoy sistemy RAN v razvitiye otechestvennogo bibliotekovedeniya, informatiki i knigovedeniya* [RAS information — library system contribution to the development of the library science, information science, and book science of Russia]. Novosibirsk. 396–402.
11. Kalenov, N. E., L. F. Kazhlideeva, and S. Ya. Verkhovskiy. 1979. Opyt informatsionno-go obsluzhivaniya uchenykh AN SSSR na baze magnitnykh lent VINITI [Experience in information service of AS USSR scientists on the basis of VINITI magnetic tapes]. *Voprosy Informatsionnoy Teorii i Praktiki* [Questions of Information Theory and Practice] 38:70–76.
12. Bazhenov, S. R., L. K. Bobrov, and N. A. Mazov. 1992. Sozdanie i ispol'zovanie problemno-orientirovannykh baz dannykh v ASNTI SO RAN [Creating and using problem-oriented databases in the ASNTI of SB RAS]. *Novye tekhnologii v informatsionno-biblioteknom obespechenii nauchnykh issledovaniy* [New technologies in the information providing of science]. Moscow. 26–29.
13. Bazhenov, S. R., B. S. Elepov, T. A. Kalyuzhnaya, O. L. Lavrik, A. I. Pavlov, G. A. Skaruk, and A. V. Shabanov. 2010. Razvitie informatsionno-bibliotechnoy sredy SO RAN v 2007–2009 gg. dlya obespecheniya nauchnykh kommunikatsiy [The development of information and library environment of SB RAS in 2007–2009 for scientific communication]. *Bibliosfera* 3:48–54.
14. Bobrov, L. K., A. V. Glushanovskiy, N. E. Kalenov, and V. A. Kapustin. 1985. Problemy avtomatizatsii informatsionnogo obsluzhivaniya uchenykh v tsentral'nykh bibliotekakh AN SSSR [Automation problems of information service scientists in the central libraries of the AS USSR]. *Nauchno-Tekhnicheskaya Informatsiya* [Scientific and Technological Information]. Ser. 1. 7:11–15.
15. Bazhenov, S. R., L. K. Bobrov, B. S. Elepov, and N. E. Kalenov. 1991. *Proektirovanie i ekspluatatsiya regional'nykh AS NTI* [Design and operation of the regional AS NTI]. Novosibirsk: Nauka. 174 p.
16. Treskova, P. P., and O. A. Oganova. 2011. Etapy formirovaniya i razvitiya bibliotechno-informatsionnoy sistemy Ural'skogo otdeleniya RAN [Stages of formation and development of library and information system of the Ural Branch of RAS]. *Bibliosfera* 3:9–16.
17. Kalenov, N. E. 2014. Elektronnye katalogi akademicheskikh bibliotek: kakimi im byt'? [Electronic catalogs of academic libraries: What would they be?]. *Teoriya i praktika obshchestvenno-nauchnoy informatsii* [Theory and practice of social and scientific information]. Moscow. 22:54–63.

18. Kalenov, N. E. 2015. Bibliotechnye Internet-katalogi i pol'zovatel' [Library Internet-catalogs and user]. *Nauchnaya Periodika: Problemy i Resheniya* [Scientific Periodicals: Problems and Solutions] 6:208–214.
19. Mironov, A. V., and L. Yu. Oleynik. 2013. *Avtomatizatsiya bibliotechnykh protsessov na osnove ABIS "IRBIS 64"* [Automatin of library processes based on the system "IRBIS 64"]. Irkutsk. 124 p.
20. Vlasova, S. A., and N. E. Kalenov. 2014. Rol' katalogov nauchnykh bibliotek v zadachakh informatsionnogo soprovozhdeniya nauchnykh issledovaniy [Role of the science libraries catalogues for scientific researches information providing]. *Informatsionnye Protsessy* [Information Processes] 14(3):232–241. Available at: <http://www.jip.ru> (accessed March 28, 2014).
21. Vlasova, S. A. 2015. Novaya versiya sistemy zakaza literatury v chital'nom zale BEN RAN [The new version of the order system of literature in the reading room of LNS RAS]. *Informatsionnoe obespechenie nauki: Novye tekhnologii* [Information providing of science: New technologies]. Moscow: BEN RAN. 254–261.
22. Varakin, V. P., and N. E. Kalenov. 2010. Upravlenie resursami tsentralizovannoy bibliotechnoy sistemy [Management of the centralized library system resources]. *Informatsionnye Resursy Rossii* [Information Resources of Russia] 3(115):2–11.
23. Varakin, V. P., and N. E. Kalenov. 2015. Realizatsiya mnogofunktional'nykh shtatnykh zaprosov dlya sistemy statisticheskogo monitoringa raboty bibliotek TsBS BEN RAN [The implementation of multifunctional full-time queries to the system of statistical monitoring of the work of libraries of CLS LNS RAS]. *Informatsionnye Resursy Rossii* [Information Resources of Russia] 5(147):9–15.
24. Varakin, V. P. and A. A. Ivanovskiy. 2015. Novaya versiya avtomatizirovannoy sistemy obrabotki i analiza dannykh o deyatel'nosti TsBS BEN RAN "Biblioteki" [The new version of the LNS automation system "Libraries" for CLS activity analysis]. *Informatsionnoe obespechenie nauki: Novye tekhnologii* [Information providing of science: New technologies]. Moscow: BEN RAN. 262–274.
25. FANO Rossii sozdaet sistemу informatsionnogo obespecheniya nauchnykh organizatsiy [FASO of Russia establishes a system for scientific organizations information support]. Available at: http://fano.gov.ru/ru/press-center/card/?id_4=34626 (accessed March 4, 2016).

Received February 12, 2016

Contributors

Vlasova Svetlana A. (b. 1960) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading scientist, Library for Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences, 11/11 Znamenka Str., Moscow 119991, Russian Federation; svlasova@benran.ru

Kalenov Nikolay E. (b. 1945) — Doctor of Science in technology, professor, director, Library for Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences, 11/11 Znamenka Str., Moscow 119991, Russian Federation; nek@benran.ru

ОБЪЕКТЫ НАУЧНОГО АВТОРСТВА И ОЦЕНКА ИХ ЗНАЧИМОСТИ

В. Д. Ильин¹

Аннотация: Предложен подход к решению проблемы оценки значимости результатов научного творчества. Введены определения объектов научного авторства и их значимости, изложены основы регистрации объектов научного авторства и защиты авторских прав исследователей.

Ключевые слова: оценка научного результата; объект научного авторства; значимость объекта авторства; открытие; изобретение; рационализация; авторское право исследователя

DOI: 10.14357/08696527160313

1 Введение

Выбор научных проектов, достойных финансирования, и оценка полученных результатов — проблемы неубывающей актуальности для тех, кто обязан стимулировать научную продуктивность, подверженную влиянию множества факторов (включая технологию публикаций и оценку значимости опубликованных результатов) [1, 2]. От решения этих проблем зависят темпы нормализации экономического механизма [3, 4].

1.1 Увлеченность индексами цитирования и импакт-факторами

Для придания «научной обоснованности» своим решениям администраторы, неравнодушные к количественным показателям «эффективности», «роста», «снижения» и т. п., требуют от подведомственных им «инстанций» соответствующих докладов. Хотя известно, что даже прикладную полезность научно-технического результата не во всех случаях можно выразить количественно: только частные оценки могут быть представлены величинами стоимости сэкономленных ресурсов или еще какими-то (в зависимости от области и способа применения результата).

Вряд ли можно количественно оценить полезность научного результата для продвижения исследований в той области, к которой он относится (или для продвижения в иных областях исследований). Не менее сомнительна возможность количественного представления полезности научного результата в просвещении и образовании.

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

Нынешний глобальный «наукометрический зуд», интенсивно стимулируемый коммерческими компаниями (Thomson Reuters, Elsevier и др.), поклонение индексам цитирования, связывание величин этих индексов с научной продуктивностью — повреждающее воздействие всего этого трудно оценить. Опасно быстро растет активность коммерческих групп, которые, не скрываясь, берутся за плату обеспечить публикацию статей в научных журналах, индексируемых SCOPUSом, входящих в список ВАК и т. д.

В научном сообществе растет число тех, кто в основном занят увеличением количества публикаций, приносящих приrostы значений индексов цитирования и импакт-факторов [5]. Неудержимо коммерциализируются научные журналы и научные издательства в целом. Торговля авторством статей в международных научных журналах процветает не только в лидирующем Китае (число статей китайских авторов, опубликованных в журналах, индексируемых Web of Science, с 2000 по 2013 гг. увеличилось более чем в 6 раз), где за такие публикации выплачиваются весьма привлекательные надбавки [6].

Манипулируя индексами Хирша и импакт-факторами сотрудников научного учреждения, администраторы «выводят» оценку научной продуктивности всего учреждения. Хотя известно, что даже из англоязычных публикаций «хиршеватели» учитывают только те, которые представлены статьями журналов, связанных коммерческими договорами с «хиршующими» компаниями [7]. Монографии если и учитывают, то только выпущенные издательствами, имеющими договора с «хиршующими».

1.2 Об учете значимости опубликованного результата

Результаты научной деятельности исследователя документально представлены опубликованными научными трудами. Если читатель научной статьи (книги или доклада) занимается исследованиями в той же области, ему интересны:

- суть опубликованного результата, его новизна, связь с другими результатами в той же области (и, возможно, в смежных областях);
- состоятельность аргументации;
- связь с ранее опубликованными результатами автора и других исследователей (она представлена элементами списка литературы).

Возможно, у читателя возникнет вопрос и о значимости опубликованного результата: *открытие, изобретение или рационализация?*

В нынешних системах измерения научной продуктивности в явном виде отсутствует учет значимости опубликованного результата. Потому и нет данных об исследователях, являющихся авторами *открытий, изобретений и рационализаций*, и об опубликованных ими научных трудах, содержащих описания таких результатов. Какой могла бы быть система оценки значимости опубликованных научных результатов, впервые было предложено автором в [1]. Данная статья является тематическим продолжением [1, 2].

1.3 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.

2 Научная продукция

Независимо от содержания научного результата и области, к которой он относится, его судьба существенно зависит от того, как составлено описание, насколько быстро и в каких изданиях оно опубликовано, как устроены процессы обсуждения, оценки значимости, распространения и др.

Целесообразность унификации описаний, сохраняемых в *человеко-машинной среде символьного моделирования произвольных объектов* (*s-среде*), неоспоримо доказана успешным развитием автоматизированного проектирования в различных предметных областях (включая проектирование программных и аппаратных средств *программируемых машин*, *s-машин*) [2]. В наши дни для описаний научных результатов обычно регламентируются только структуры и форматы документов, хотя в *s-среде* с описаниями научных результатов можно работать так же, как в системах автоматизированного проектирования работают с проектной документацией.

□ *Научный результат* — модель системы знаний (или составляющая ранее определенной и опубликованной модели), описывающая совокупность объектов, включающую изучаемый объект, и связи между ними. Описание модели представлено в форме сообщения, рассчитанного на распознавание и интерпретацию научным сообществом. □

Значение результата зависит от предсказательной силы, воспроизводимости и применимости модели, а также от свойств сообщения, содержащего ее описание.

□ *S-модель* са *системы понятий* — это пара $\langle \text{mem}_{\text{sc}} \approx \text{память модели sc}$ с системы *sC* понятий, $\langle \text{rel}(\text{mem}_{\text{sc}}) \approx \text{семейство связей, заданных на } \text{mem}_{\text{sc}} \rangle$ (где *sc* — помета). □

□ *Определение системы понятий* — описание ее *s*-модели, сопровождаемое указанием области применимости.

Описание представлено в форме сообщения, рассчитанного:

- на интерпретацию научным сообществом;
- представление, сохранение, распространение, накопление и поиск в *s-среде*. □

Определение системы понятий должно удовлетворять *необходимым требованиям конструктивности*:

- представление в виде пары *⟨определение области применимости⟩, ⟨s-модель системы понятий⟩*;
- в систему понятий, считающуюся определенной, не должны входить понятия, не имеющие определений (и при этом не относящиеся к понятиям-аксиомам).
 - *Определение области применимости модели* — это описание типов:
- корреспондента (кому адресовано определение);
- цели, в процессе достижения которой определение имеет смысл (классы задач, при изучении которых определение может быть полезно);
- стадии, на которой целесообразно использовать определение (концепция, методология решения и т. д.). □

Область применимости модели может принадлежать совокупности областей, в которых исследуются природные объекты, или к совокупности областей, в которых изучаются изобретаемые объекты.

□ *S-модель системы знаний* — триада *⟨са ≈ s-модель системы Sc понятий⟩, ⟨set_{Ing} ≈ s-модель совокупности языков сообщений, интерпретируемых на са⟩, ⟨set_{intr} ≈ s-модель совокупности интерпретаторов на са сообщений, составленных на языках из set_{Ing}⟩*. □

Интерпретация сообщения на модели са:

1. Построение выходного сообщения (извлечение информации) по заданному входному (сообщения представлены на языках из совокупности set_{Ing}).
2. Анализ выходного сообщения (требуются ли изменения в модели са).
3. Если требуется, то изменение модели са; если нет — завершение.

2.1 Виды научной продукции

□ Основными видами научной продукции являются:

- опубликованные модели знаний (представленные в статьях, монографиях, отчетах о выполненных научно-исследовательских работах);
- физически реализованные модели изобретенных объектов;
- рецензии на модели знаний, изобретенные другими;
- результаты образовательной и экспертной деятельности;
- просветительская продукция (энциклопедические статьи; сайты, посвященные популярному изложению научных результатов и др.). □

Научные материалы:

- статьи, монографии, отчеты о выполненных НИР и другие документы, содержащие описания результатов научных исследований, дискуссий, совещаний и других составляющих научной деятельности;
- физические модели, макеты научно-технических сооружений и др.

3 Объекты научного авторства

Целесообразно разделить научные, инженерные и другие объекты авторства. К другим относятся произведения архитектуры, художественной литературы и пр. Возможность заработать на научном авторстве должна возникать в том случае, если профессиональным сообществом признано, что объект научного авторства усовершенствовал систему научных знаний или/и стал основанием для создания новой технологии, устройства или еще чего-то, что производится и продается.

Если доказано несанкционированное заимствование идеи или другой существенной части объекта научного авторства, то автор должен получить часть штрафа, который обязан уплатить нарушитель авторского права исследователя (какую-то часть штрафа, конечно, должны получить отыскавшие нарушителя и правовыми способами убедившие его уплатить штраф).

В концепции *научного авторства* должны содержаться ответы на следующие вопросы:

1. Авторы вещей какого типа достойны статусного повышения?
2. Кто и каким способом должен определять типы вещей, которые целесообразно рассматривать как объекты научного авторства?
3. Какие объекты научного авторства следует рассматривать как национальное достояние, а их описание — как важную часть государственных *информационных ресурсов* [2]?
4. Руководствуясь какими системами правил, научные сообщества авторов могут осуществлять экспертизу объектов научного авторства, претендующих на регистрацию и размещение в государственных хранилищах (библиотеках, архивах и др.)?

3.1 Символьные и несимвольные объекты научного авторства

Объекты научного авторства делятся на *символьные* и *несимвольные*. К символным относятся книги, статьи, тексты программ для 8-машин и другие символные сообщения, для каждого из которых указаны язык (или языки) сообщения и средства, необходимые для интерпретации сообщения.

Отличительным признаком символьных объектов научного авторства является относительно легко (по сравнению с несимвольными объектами) осуществляющее копирование без искажений и распространение копий [2]. К несимвольным объектам научного авторства относятся физические модели.

3.2 Значимость объекта авторства: рационализация, изобретение, открытие

○ Доказано существование некоторого элемента, до того отсутствовавшего в таблице Менделеева, — это *открытие*. ○

Изобретаются методы решения задач и технологии, языки и системы программирования (○ создание Веба (Web) — *изобретение* ○). Усовершенствование существующего изобретения (метода решения некоторой задачи, технологии, устройства или другие вещи) — это *рационализация* (○ создание USB 3.0 — *рационализация* ○).

3.3 Авторство, признаваемое государством

□ Объектом признаваемого государством научного авторства (*объектом научного авторства*) служит созданная автором вещь [книга (электронная, бумажная или на ином носителе), аудиозапись, видеозапись и др.], на которую по установленной законом форме может быть заявлено *авторское право исследователя*. □

□ Субъектом научного авторства (*автором-исследователем*) может быть физическое лицо или несколько физических лиц. □

Объект научного авторства должен быть зарегистрирован, а его специфицированное описание размещено в государственном хранилище. В каждом государственном хранилище объектов научного авторства должен существовать электронный каталог хранящихся описаний объектов научного авторства, а описание каждого из них должно быть представлено стандартной (для каждого типа объектов научного авторства) гипермейдийной спецификацией, содержащей изображение хранящегося объекта.

3.4 Определение значимости объекта авторства

□ Определение значимости объектов научного авторства, зарегистрированных в государственных хранилищах, осуществляется научными сообществами в процессе публичного обсуждения (на сайтах сообществ) [1, 2]. □

3.5 Документальное подтверждение авторства

□ Документом, подтверждающим авторство, служит свидетельство о регистрации объекта авторства в государственном хранилище (*авторское свидетельство исследователя*). Оно содержит установленное законом описание объекта научного авторства (*спецификацию объекта научного авторства*) и субъекта научного авторства. □

Каждое из профессиональных сообществ, признавших объект авторства, выставляет одну из трех оценок значимости объекта авторства (*рационализация, изобретение, открытие*). В поле «*Кем установлена значимость объекта авторства*» заносится описатель профессионального сообщества, дата принятия решения, гиперссылки на протокол о принятии решения и базу данных обсуждения оцененного объекта авторства.

4 Авторские права исследователя и их защита

□ Авторское право исследователя возникает в момент зарегистрированной публикации объекта научного авторства, принадлежит только автору-исследователю и не может быть никому передано. □

□ Право на получение части или всего вознаграждения, связанного с научным авторством (*право получения авторского вознаграждения*), может быть передано в соответствии с юридически оформленным распоряжением автора. □

□ Правовая защита авторского права заключается в определенном законом преследовании нарушителей авторского права. Обязанность государства защищать авторское право возникает с момента регистрации объекта авторства в государственном хранилище (например, в Российской государственной библиотеке). □

Выявлением фактов плагиата или иного нарушения авторских прав занимается авторы и/или уполномоченные ими физические и/или юридические лица. Вознаграждение уполномоченных осуществляется в соответствии с договором, заключенным с автором или иным обладателем права получения авторского вознаграждения. Договорная плата за выявленное и доказанное нарушение авторского права — это часть предусмотренного законом штрафа, который нарушитель обязан выплатить автору или обладателю права получения авторского вознаграждения.

◊ О том, как в наши дни «запищают» права авторов, не являющихся исследователями, можно получить некоторое представление из материалов, опубликованных в [8, 9]. ◊

Заключение

1. Информатизация научной и образовательной деятельности не может быть эффективной без изменения существующих технологий описания научных результатов, публикации, обсуждения, оценки значимости, сохранения и распространения опубликованных научных материалов в *s*-среде.
2. Будет ли создана система регистрации научных *открытий, изобретений и рационализаций* — во многом зависит от позиции научных администраторов. Противниками такой системы являются те из них, кто возглавляет научные учреждения, сотрудники которых не могут предъявить опубликованные результаты, претендующие на статус научных *открытий, изобретений и рационализаций*.

тений и рационализаций. Еще нежелательнее для таких администраторов, если денежные средства станут выделять с привязкой к числу и значимости сделанных открытий, изобретений и рационализаций.

Литература

1. Ильин В. Д. Технология научной деятельности: подход к повышению продуктивности // Управление большими системами. — М.: ИПУ РАН, 2010. Вып. 29. С. 88–107.
2. Ильин А. В., Ильин В. Д. Научно-образовательные веб-ресурсы. S-моделирование. — М.: ИПИ РАН, 2013. 112 с. doi: 10.13140/2.1.2276.4484. <https://www.researchgate.net/publication/259654372>.Naucno-obrazovatelnye_veb-resursy_S-modelirovaniye_Scientific-educational_Web-resources_S-modeling.
3. 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. http://online.agris.cz/files/2014/agris_on-line_2014_3_ilyin_ilyin.pdf.
4. Ильин А. В., Ильин В. Д. Информатизация экономического механизма. — М.: ИПИ РАН, 2015. 130 с. doi: 10.13140/RG.2.1.2003.8167. <https://www.researchgate.net/publication/292059684>.Informatizacia_ekonomiceskogo_mehanizma_Informatization_of_economic_mechanism.
5. The Thomson Reuters impact factor // Web of Science, 30.06.2016. <http://wokinfo.com/essays/impact-factor/>.
6. Ching N. Fameis fortunein sino-science // Nautilus, 19.09.2013. http://nautil.us/issue/5/fame/fame-is-fortune-in-sino_science.
7. Ильин В. Д. ХИРШевание и научная продуктивность // CNews Club, 15.11.2013. http://club.cnews.ru/blogs/entry/hirschevanie_i_nauchnaya_produktivnost.
8. Русаяева П., Рождественский И., Сухаревская А. МВД и ФСБ раскрыли мошенническую схему в Российском авторском обществе // РБК, 27.06.2016. http://www.rbc.ru/technology_and_media/27/06/2016/5771024c9a794701b8978fcb?from=main.
9. Сухаревская А., Русаяева П., Рождественский И. Суд арестовал главу Российского авторского общества // РБК, 28.06.2016. http://www.rbc.ru/technology_and_media/28/06/2016/577259e99a7947fc2b79e9e2.

Поступила в редакцию 02.07.16

OBJECTS OF SCIENTIFIC AUTHORSHIP AND ASSESSMENT OF THEIR SIGNIFICANCE

V. D. Ilyin

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

Abstract: The article suggests an approach to the problem of assessing the significance of the results of scientific activity. Definitions of objects of scientific authorship and their significance are introduced. The fundamentals of registration of scientific authorship and copyright protection are expounded.

Keywords: assessment of the scientific result; object of scientific authorship; discovery; invention; rationalization; significance of the authorship object; researcher's copyright

DOI: 10.14357/08696527160313

References

1. Ilyin, V. D. 2009. Tekhnologiya nauchnoy deyatel'nosti: Podkhod k povysheniyu produktivnosti [Technology of scientific activities: An approach to improve efficiency]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Large-scale Systems Control (Russia)] 25:116–138. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/bd109ea5ef3c6608bfb4b845776af036/ubs387.pdf> (accessed June 30, 2016).
2. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2013. *Nauchno-obrazovatel'nye web-resursy. S-modelirovanie* [Scientific-educational Web resources. S-modeling]. Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 112 p. doi: 10.13140/2.1.2276.4484. Available at: https://www.researchgate.net/publication/259654372_Naucno-obrazovatelnye_web-resursy_S-modelirovanie_Scientific-educational_Web-resources_S-modeling (accessed October 10, 2016).
3. 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. Available at: http://online.agris.cz/files/2014/agris_on-line_2014_3_ilyin_ilyin.pdf (accessed June 30, 2016).
4. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2015. *Informatizatsiya ekonomicheskogo mehanizma* [Informatization of economic mechanism]. Moscow: Institute of Informatics Problems of Russian Academy of Sciences. 130 p. doi: 10.13140/RG.2.1.2003.8167. Available at: https://www.researchgate.net/publication/292059684_Informatizacija_ekonomiceskogo_mehanizma_Informatization_of_economic_mechanism (accessed October 10, 2016).
5. The Thomson Reuters impact factor. 30.06.2016. *Web of Science*. Available at: <http://wokinfo.com/essays/impact-factor/> (accessed June 30, 2016).
6. Ching, N. 19.09.2013. Fame is fortune in sino-science. *Nautilus*. Available at: <http://nautil.us/issue/5/fame/fame-is-fortune-in-sino-science> (accessed June 30, 2016).

7. Ilyin, V. D. 15.11.2013. KhIRShevaniye i nauchnaya produktivnost' [Enthusiasm for the h-index and research productivity]. *CNewsClub*. Available at: http://club.cnews.ru/blogs/entry/hirshevaniye_i_nauchnaya_produktivnost (accessed June 30, 2016).
8. Rusyaeva, P., I. Rozhdestvenskiy, and A. Sukharevskaya. 27.06.2014. MVD i FSB raskryli moshennicheskuyu skhemu v Rossiyskom avtorskom obshchestve [The Ministry of Internal Affairs and the Federal Security Service have disclosed a fraudulent scheme in the Russian Authors Society]. *RBC*. Available at: http://www.rbc.ru/technology_and_media/27/06/2016/5771024c9a794701b8978fc?from=main (accessed June 30, 2016).
9. Sukharevskaya, A., P. Rusyaeva, and I. Rozhdestvenskiy. 28.06.2014. Sud arrestoval glavu Rossiyskogo avtorskogo obshchestva [The court arrested the head of the Russian Authors Society]. *RBC*. Available at: http://www.rbc.ru/technology_and_media/28/06/2016/577259e99a7947fc2b79e9e2 (accessed June 30, 2016).

Received July 2, 2016

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 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation; vdilyin@yandex.ru

ОБ ОБУЧЕНИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ И МЕДИАГРАМОТНОСТИ В РОССИЙСКИХ НАЧАЛЬНЫХ ШКОЛАХ*

Д. А. Богданова¹

Аннотация: С учетом современного западного опыта включения в образовательные программы начальной и средней школы разделов, посвященных обучению детей информационной и медиаграмотности, являющихся основополагающими понятиями в формировании навыков безопасного поведения во Всемирной паутине, анализируются «Федеральный государственный образовательный стандарт начального общего образования» и «Примерная основная образовательная программа начального общего образования» на предмет наличия в этих документах (аналогичных) разделов, посвященных обучению правилам интернет-безопасного поведения. В результате проведенного анализа делается вывод о том, что, несмотря на упоминание в каждом из документов отдельных аспектов, так или иначе связанных с безопасностью в Интернете, в них отсутствуют явно сформулированные ожидания и четкие рекомендации по формированию необходимых навыков. Помимо этого, неожиданно был получен еще один, дополнительный результат. С учетом современных тенденций обучения через достижение метапредметных результатов, выражющихся в формировании универсальных учебных действий «в процессе изучения всех без исключения предметов», и проведенного анализа ожидаемых предметных результатов делается вывод об отсутствии в программе каждого из предметов разделов, направленных на формирование универсальных учебных действий, способствующих достижению перечисленных метапредметных результатов. Наличие в программе отдельно сформулированных условий, только при выполнении которых содержание предметов может стать средством формирования универсальных учебных действий, явилось подтверждением выявленных противоречий.

Ключевые слова: медиаграмотность; информационная грамотность; интернет-безопасность; Федеральный государственный образовательный стандарт начального общего образования; Примерная основная образовательная программа начального общего образования; метапредметные результаты; универсальные учебные действия; информационные технологии; цифровое гражданство

DOI: 10.14357/08696527160314

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2013–2020 годы). Тема № 34.2. Когнитивные мультимедиа и интерактивность в образовании.

¹ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, d.a.bogdanova@mail.ru

Современная технологическая революция вводит новый взгляд на взаимодействие людей с информацией, на знания и умения, необходимые для жизни в современную эпоху, когда информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) становятся неотъемлемой составляющей нашей жизни. По мнению целого ряда специалистов, в частности [1], в цифровую эру совершенно необходимыми будут особые когнитивные умения, позволяющие успешно взаимодействовать с информацией в режиме реального времени, а люди, которые будут обладать умениями находить нужную информацию, анализировать, критически оценивать, структурировать и классифицировать ее, бесспорно, будут иметь социальное, культурное и экономическое преимущество. В Великобритании 2014 г. три четверти опрошенных детей возраста 6–15 лет сказали, что не представляют своей жизни без технологий, при этом 60% смотрят новости через Интернет, только 3% общего времени, потраченного на общение, у них занимает телефон [2].

В российских городах-миллионниках сотовый телефон используют 87% родителей и 60% детей, компьютер — 80% родителей и 62% детей [3]. Среда, в которой мы живем, существенно изменилась: пользовательская аудитория Интернета, благодаря расширяющемуся появлению в ней детей, стремительно молодеет. Поэтому детей необходимо начинать готовить к жизни в цифровой среде раньше, чем было принято считать еще лет 6 назад: необходимо делать это в начальной школе. Следует начинать с формирования навыков, определяемых специалистами как информационная и медийная грамотность, являющихся основополагающими в обучении базовым правилам безопасного поведения во Всемирной паутине.

Институт ЮНЕСКО по информационным технологиям в образовании (далее — Институт ЮНЕСКО), считая медийную и информационную грамотность тесно взаимосвязанными понятиями, объединяет их с учебными целями в одно и определяет ее как умение оценивать медиа и других поставщиков информации на основе сведений о том, что они производят, какие послания распространяют, а также оценивать роль целевой аудитории. Медиа- и информационная грамотность помогает выработать «умения, знание и понимание, каким образом использовать весь спектр возможностей, предоставляемых традиционными и новыми коммуникационными сервисами. Она также позволяет людям защитить себя и свои семьи от возможных рисков, связанных с использованием этих сервисов» [4]. Декларация ЮНЕСКО, принятая в Париже в мае 2014 г., посвящена необходимости формирования у всех граждан всех возрастов, а особенно у молодежи, информационной и медиаграмотности. Как уже было сказано, эти понятия тесно взаимосвязаны и совершенно необходимы для жизни в современном обществе. В мае 2016 г. Совет Евросоюза принял резолюцию о развитии информационной грамотности и критического мышления через образование и воспитание. Совет признает преимущества и возможности, которые могут дать Интернет и социальные медиа, однако на первый план выдвигает потенциальные угрозы и опасности, которые они могут представлять. Подчеркивается фундаментальная роль образования в оказании помощи под-

растяющему поколению стать медиаграмотными и ответственными гражданами будущего [5].

Важность включения в федеральные государственные образовательные стандарты обучения медиа- и информационной грамотности не подлежит сомнению. Это подтверждается и западным опытом школьного образования, о чём будет сказано далее. Существует ряд различных дисциплинарных подходов к обучению информационной и медиаграмотности. Некоторые ученые и педагоги концентрируются на информационной грамотности, с особым вниманием к техническим и исследовательским умениям, к использованию цифрового инструментария, включая редактирование фото и видео, системы поиска. Другой подход известен как «критическая грамотность», предполагает акцент на социальном и политическом контекстах, может пониматься как техники, используемые специалистами медиа и маркетологами. Целый ряд специалистов считает, что учащимся приведенных выше подходов недостаточно и что следует обучать правилам цифрового гражданства и индивидуального потребления медиа. Цифровое гражданство представляет собой новую формирующуюся, непрерывно эволюционирующую концепцию, позволяющую учителям и специалистам в области информационных технологий понимать, что нужно знать учащимся, чтобы пользоваться технологиями надлежащим образом, это способ подготовки учащихся к жизни в обществе, насыщенном технологиями. Институт ЮНЕСКО видит три возможных модели организации обучения в школе:

- (1) школа принимает решение об интеграции обучения медиа- и информационной грамотности в дополнение к конкретным предметам, или вместо них, или их перекрестное использование;
- (2) школа выбирает стратегию наложения учебных планов, полагая, что обучение способности критического отбора информации из медиа и формирование навыков создания и обмена информацией при помощи ИКТ должны стать частью преподавания во всех дисциплинах, причем учить этому надо как учеников, так и учителей;
- (3) школа включает в программу конкретные предметы, связанные с медийной и информационной грамотностью и, соответственно, формируются специальные программы и предметы [4].

В школах Финляндии обучение проходит по второй модели [4]. В школах Австралии обучение проходит по первой модели, причем организуются еженедельные онлайновые уроки для обучающихся начальной и младших классов средней школы [6]. В британских школах обучение базовым принципам информационной и медиаграмотности с 2014 г. стало частью Национальной образовательной программы для детей 5–16 лет. В рамках новой программы по информатике детей начинают обучать базовым правилам интернет-безопасности в начальной школе с 5-летнего возраста, в средних школах программа посвящена вопросам ответственного и безопасного использования технологий, включая защиту собственной идентичности [7]. На примере штата Пенсильвания (США) видно,

что обучение основным правилам цифровой грамотности, включая безопасность, этикет, цифровые права и обязанности, также входит в программу школьного обучения на разных уровнях (от начального до среднего) [8].

Приведенные западные примеры иллюстрируют как сам факт обучения интернет-безопасности в школах, так и возможные модели обучения.

В России пока что отсутствует единая комплексная разработанная программа обучения информационной и медиаграмотности, обучение происходит не систематически, в достаточной степени индивидуально, нередко — случайно, за счет общения со сверстниками, или анализа собственных совершенных ошибок, или благодаря усилиям энтузиастов, сознающих важность подобной работы. Следует отметить в этом смысле совместный проект компании Яндекс и сети Дневник или, например, работу Научно-образовательного центра «Безопасное использование образовательных ресурсов Интернета» по обучению школьников Архангельской области базовым правилам безопасного поведения в Интернете, созданного Федеральным исследовательским центром «Информатика и управление» Российской академии наук совместно с Архангельским областным институтом открытого образования.

Проанализируем Федеральные государственные образовательные стандарты начального общего и основного общего образования (ФГОС НОО и ФГОС ООО) и Примерные основные образовательные программы начального и основного общего образования (ПООП НОО и ПООП ООО) на предмет наличия в них разделов, напрямую или опосредованно ориентированных на обучение правилам безопасного поведения во Всемирной паутине, поскольку именно в этом возрасте, в этот период обучения дети начинают осваивать и активно использовать возможности цифровых коммуникаций. Также рассмотрим учебники по информатике, насколько это окажется возможным.

Эта публикация является первой частью проведенного исследования и посвящена анализу ФГОС НОО и ПООП НОО. Хотя ФГОС НОО утвержден с учетом изменений в сентябре 2011 г. [9], существующая редакция примерной основной образовательной программы начального общего образования [10] утверждена в 2015 г. Поэтому есть основания надеяться, что в обновленной программе учтены веяния, точнее сказать, настоятельные требования времени.

ФГОС НОО формулирует следующие метапредметные результаты с использованием ИКТ¹.

Раздел 11: «Метапредметные результаты должны отражать:

⟨...⟩ 8)... использование различных способов поиска (в справочных источниках и открытом учебном информационном пространстве сети Интернет), сбора... обработки, анализа, организации, передачи и интерпретации информации в соответствии с коммуникативными и познавательными задачами и технологиями учебного предмета; в том числе умение вводить текст с помощью клавиатуры, фиксировать... (записывать) в цифровой форме измеряемые величины и анали-

¹Рассматриваются только разделы, релевантные тематике исследования.

зировать изображения, звуки, готовить свое выступление и выступать с аудио-, видео- и графическим сопровождением; соблюдать нормы информационной избирательности, этики и этикета» (с. 6). Рассмотрим этот раздел подробнее. Возникает сразу много вопросов. Во-первых, что понимается под открытым учебным пространством? Этот термин применительно к электронному обучению имеет несколько значений [11], однако не удается применить ни одно из них. Во-вторых, что понимается под учебным информационным пространством сети Интернет и каким образом можно идентифицировать, что это именно оно? В-третьих, что означает цифровая форма измеряемых величин? Если присутствует термин «измерение», значит, есть и единица измерения (или в данном случае имеется в виду полученное значение, записанное двоичным кодом?). Далее, не ясно, что понимается под аудио-, видео- и графическим сопровождением своего выступления. Означает ли это, что обучающийся научится готовить презентации, включая в них аудио-, видео- и графические материалы? Что такое нормы информационной избирательности, этики и как их соблюдать?

Логично предположить, что обучение созданию презентаций, нормам этики и этикета должно происходить на уроках информатики. Однако в соответствии с ФГОС ожидаемые предметные результаты освоения курса «Математика и информатика» (разд. 12.2, п. 5) должны отражать «приобретение первоначальных представлений о компьютерной грамотности» (с. 8). Очевидно наличие явного противоречия между сформулированными метапредметными результатами и ожидаемыми результатами освоения предмета.

Допустим, однако, что выявленное противоречие будет скомпенсировано соответствующими разделами в ПООП НОО. В планируемых предметных результатах освоения Программы существует два блока: «Выпускник научится» и «Выпускник получит возможность научиться». Автором рассматривалась лишь та система знаний и учебных действий, которая может быть освоена подавляющим большинством детей. Эта система отражена в блоке Программы «Выпускник научится». Пункт 1.2.1. Формирование универсальных учебных действий (с. 15): **«В результате изучения всех без исключения учебных предметов выпускник научится:**

Познавательные универсальные учебные действия (УУД) (с. 18)
⟨...⟩ — осуществлять поиск необходимой информации для выполнения учебных заданий с использованием учебной литературы, энциклопедий, справочников (включая электронные, цифровые) в открытом информационном пространстве, в том числе контролируемом пространстве сети Интернет...»

Входит ли поиск информации в Интернете в перечень первоначальных представлений о компьютерной грамотности? Еще один вопрос: что такое контролируемое пространство сети Интернет?

Коммуникативные универсальные учебные действия (с. 20)
«Выпускник научится:
⟨...⟩ владеть диалогической формой коммуникации, используя, в том числе, средства и инструменты ИКТ и дистанционного общения».

Этот раздел также вызывает вопросы: каким образом будет производиться отработка УУД, связанных с использованием диалогической формы коммуникации, используя ИКТ и дистанционное общение? Каким образом и с кем будет организовано дистанционное общение? Очевидно, что для выполнения таких учебных действий выпускник должен получить навыки, более обширные, чем «приобретение начальных представлений о компьютерной грамотности», о чем говорится в ФГОСе. Тогда возникает следующий вопрос, в рамках изучения каких предметов сможет выпускник приобрести эти навыки, если на уроках информатики он получит лишь начальные представления?

1.2.1.1. Чтение. Работа с текстом (метапредметные результаты) (с. 21)

Этот раздел посвящен предмету «Чтение» и вроде бы мог и не рассматриваться. Но он привлек внимание содержанием последнего абзаца, посвященного формированию критического отношения к получаемой информации, что является одним из требуемых навыков безопасного поведения в Интернете.

«В результате изучения **всех без исключения учебных предметов** на при¹ получении начального общего образования выпускники приобретут первичные навыки работы с содержащейся в текстах информацией в процессе чтения соответствующих возрасту литературных, учебных, научно-познавательных текстов, инструкций...»

Работа с текстом: оценка информации

Выпускник научится:

«на основе имеющихся знаний, жизненного опыта подвергать сомнению достоверность прочитанного, обнаруживать недостоверность получаемых сведений, пробелы в информации и находить пути восполнения этих пробелов...»

Неясно, при чтении каких именно текстов обучающиеся получат возможность «подвергать сомнению достоверность прочитанного...» и т. д. Ранее, в п. 1.2.1.1, сказано о чтении только «соответствующих возрасту литературных, учебных, научно-познавательных текстов, инструкций». Единственное, о чем можно подумать, это «Вредные советы» Г. Остера. Но в этом случае само заглавие уже формирует отношение.

1.2.1.2. Формирование ИКТ-компетентности обучающихся (метапредметные результаты) (с. 24)

«В результате изучения **всех без исключения предметов** на уровне начального общего образования начинается формирование навыков, необходимых для жизни и работы в современном высокотехнологичном обществе. Обучающиеся приобретут опыт работы с информационными объектами, в которых объединяются текст, наглядно-графические изображения, цифровые данные, неподвижные и движущиеся изображения, звук, ссылки и базы данных и которые могут передаваться как устно, так и с помощью телекоммуникационных технологий или размещаться в Интернете». Сказанное, очевидно, означает, что выпускник овладеет приемами и разновидностями размещения информации во Всемирной

¹Так в программе.

паутине. Только на каком предмете он этому научится? Параллельно возникает вопрос: каким образом информационные объекты, в которых, среди прочего, объединяются ссылки и базы данных, могут передаваться устно?

«Обучающиеся познакомятся с различными средствами ИКТ, освоят безопасные... принципы работы с ними...» Здесь возникает тот же вопрос: на каких уроках и каким образом состоится это знакомство?

Здесь же говорится о том, что в соответствии с ожидаемыми метапредметными результатами выпускник научится «редактировать тексты, последовательность изображений, слайды, включая редактирование цепочек изображений, видео- и аудиозаписей, фотоизображений... заполнять учебные базы данных» и т. д. (с. 26–27). Возникает тот же вопрос. Для прояснения возникших вопросов, очевидно, потребуется проанализировать ожидаемые предметные результаты по «всем без исключения предметам».

Однако еще до начала анализа предметных результатов в программе встречается «интересный» раздел **«2.1.5. Условия, обеспечивающие развитие универсальных учебных действий у обучающихся»** (с. 124). В нем говорится, что указанное содержание учебных предметов «может стать средством формирования перечисленных УУД только при соблюдении определенных условий организации образовательной деятельности», в том числе, и в основном, при соблюдении эффективного использования средств ИКТ. В частности, говорится, что ИКТ могут применяться при оценке сформированности УУД, а также их формирования:

- познавательные УУД — поиск информации, фиксация информации и т. д.;
- регулятивные УУД — создание цифрового портфолио и т. д.;
- коммуникативные УУД — обмен гипермедиаобращениями и т. д.

Формирование ИКТ-компетентности обучающихся происходит в рамках системно-деятельностного подхода, на основе изучения всех без исключения предметов учебного плана и т. д.

Иначе говоря, ожидаемый результат наступит только при выполнении определенных условий. Казалось бы, разработки, предлагаемые для широкого использования, для внедрения, должны давать гарантированный результат без каких бы то ни было ограничительных условий.

Эти условия еще раз подробно перечислены в секции 3, как-то: «Информационно-методические условия реализации основной образовательной программы... Механизмы достижения целевых ориентиров в системе условий» и т. д. И в них все так же содержится упоминание выступления с аудио-, видеосопровождением, работа с гипермедиаобращениями и т. д. при оставшемся неизменным перечне ожидаемых предметных достижений и рекомендациями по заполнению портфеля достижений.

Происходящее напоминает истории про древних алхимиков, которым «удалось» получить золото. А если кто-то пробовал повторить их успех и терпел

неудачу, то «успешный» алхимик всегда находил причину для объяснения провала последователя: какие-то условия не были соблюдены.

При наличии требования о соблюдении определенных условий представляет-ся целесообразным разбить программу еще на два блока, для двух случаев: «при соблюдении определенных условий организации образовательной деятельности» и «при отсутствии возможности соблюдения определенных условий организации образовательной деятельности» аналогично разбивке планируемых результатов на два блока «Выпускник научится» и «Выпускник получит возможность научиться».

В существующем виде примерной программы анализ перечней предметных результатов не дал ни одного из метапредметных результатов, которые, как было сказано ранее, должны быть сформированы в результате изучения **всех без исключения предметов**.

По-видимому, результаты формулировались как раз на случай отсутствия возможности соблюдении определенных условий организации образовательной деятельности. Незначительное исключение составил предмет **«2.2.2.9. Технология»** (с. 196), где в разделе **«Практика работы на компьютере»** на с. 198 хотя бы упомянута «работа с цифровыми образовательными ресурсами... создание небольшого текста по интересной детям тематике, вывод текста на принтер, использование рисунков из ресурса компьютера, программ Word и Power Point», но нет ни редактирования цепочек видеоизображений, аудиофайлов и т. д., ни обмена гипермедиаобращениями и т. п.

Помимо перечней результатов по каждому предмету еще одним серьезным подтверждением расхождения сформулированных метапредметных результатов с реальными ожиданиями являются рекомендации по заполнению **«Портфеля достижений»**. В него рекомендуется включать: по технологии — фото- и видеоЗображения продуктов исполнительской деятельности, продукты собственного творчества, аудиозаписи монологических высказываний (но ничего не говорится об аудиовизуальной поддержке). Результаты по информатике даже не упомянуты. Метапредметные результаты, выражющиеся в сформированности целого комплекса **УУД** в процессе изучения **всех без исключения предметов**, в перечень рекомендованных для включения в «Портфель достижений» материалов также не включены.

Таким образом, анализ ФГОС и ПООП НОО выявил отсутствие системно и обоснованно сформулированных ожиданий по формированию навыков безопасного поведения в Интернете. Кроме того, обнаружилось несоответствие объявленных метапредметных результатов реальным ожиданиям результатов самих разработчиков по каждому курсу. Это и понятно: невозможно формирование результатов как следствия изучения **«всех без исключения предметов»**, когда в программе каждого отдельного предмета отсутствуют разделы, направленные на формирование этого результата. Это несоответствие отражено и в рекомендациях по формированию «Портфеля достижений».

По мнению автора, в программе следовало бы четко сформулировать, какие именно навыки безопасного поведения необходимо сформировать для каждой возрастной категории, какие задачи решаются для достижения этих целей. Например, для младших классов начальной школы это могла бы быть сохранность личной информации, сетевой этикет в комплексе с правилами работы за компьютером в школе и дома. Для следующей возрастной категории — другая группа навыков. А разница между категориями должна быть менее одного года, поскольку дети набирают умения очень быстро, а технологии развиваются еще быстрее.

Анализ ФГОС ООО и ПООП ООО, а также краткий обзор содержания отдельных учебников по информатике будет приведен в следующей статье.

Литература

1. *Passig D.* A taxonomy of ICT mediated future thinking skills // Information and communication technologies in education: The school of the future / Eds. H. Taylor, P. Hogenbrik. — Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 103–112.
2. Ofcom. The communications market report. http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/research/cmr/cmr14/UK_0.pdf.
3. Дети-гаджеты // Интернет в цифрах, 2015. № 3(23). С. 10–20.
4. Педагогические аспекты формирования медийной и информационной грамотности. — Институт ЮНЕСКО по информационным технологиям в образовании. <http://iite.unesco.org/pics/publications/ru/files/3214708.pdf>.
5. Council conclusions on developing media literacy and critical thinking through education and training. <http://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2016/05/30-31-eycs-conclusions-developing-media-literacy>.
6. *Богданова Д. А.* Интернет-безопасность (опыт Австралии) // Дистанционное и виртуальное обучение, 2010. № 5. С. 117–128.
7. GOV.UK: Department for Education. <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-education>.
8. The Education Resources Information Center. The United States Department of Education. <http://eric.ed.gov/?id=ED553014>.
9. Федеральный государственный образовательный стандарт начального общего образования. [минобрнауки.рф/документы/922](http://minobrnauki.ru/dokumenty/922).
10. Примерная основная образовательная программа начального общего образования. [минобрнауки.рф/документы/922/файл/227/роор_лоо_reestr.doc](http://minobrnauki.ru/dokumenty/922/файл/227/роор_лоо_reestr.doc).
11. *Богданова Д. А.* О трактовке понятий «открытая» и «представительство» применительно к информационно-образовательной среде // Информационные технологии для новой школы: Мат-лы VI Междунар. конф. — СПб., 2015. Т. 3. С. 104–107.

Поступила в редакцию 14.07.16

ON THE INFORMATION AND MEDIALITERACY TEACHING IN THE SCHOOLS OF RUSSIA

D. A. Bogdanova

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

Abstract: The article analyzes the State Federal Educational Standard and Exemplary Basic Educational Programs of basic primary and middle education with the account on contemporary western primary and middle school experience in inclusion into curriculums some aspects on information and media literacy as basic concepts of e-safety. The analysis concludes that, despite the references in each of the individual aspects of the documents, one way or another related to security on the Internet, they lack clearly articulated expectations and clear recommendations on the formation of the necessary skills. Besides, an unexpected result was received. The conclusion was made on the absence of measures for developing in all subjects' programs aimed at creating universal educational actions contributing to the achievement of these metasubject results. A separate chapter in the program that describes the conditions, under which only the results could be achieved, was identified as the evidence of contradictions.

Keywords: media literacy; information literacy; e-safety; state federal educational standard on exemplary basic primary education; exemplary basic educational programs of basic primary education; metasubject results; teaching-learning activities; information technologies; digital literacy

DOI: 10.14357/08696527160314

Acknowledgments

The work was executed under the Program of Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for the long term (2013–2020). Theme No. 34.2. Cognitive multimedia and interactivity in education.

References

1. Passig, D. 2001. A taxonomy of ICT mediated future thinking skills. *Information and communication technologies in education: The school of the future*. Eds. H. Taylor and P. Hogenbrik. Boston: Kluwer Academic Publishers. 103–112.
2. Ofcom. The communications market report. Available at: http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/research/cmr/cm14/UK_Q.pdf (accessed June 30, 2016).
3. Deti-gadzhety [Kids-gadgets]. 2015. *Internet v tsifrakh* [Internet in Numbers] 3(23):10–20.

4. Pedagogicheskie aspekty formirovaniya mediynoy i informatsionnoy gramotnosti [Pedagogical aspects of information and media literacy development]. UNESCO Institute for Information Technologies in Education. Available at: <http://iite.unesco.org/pics/publications/ru/files/3214708.pdf> (accessed June 30, 2016).
5. Council conclusions on developing media literacy and critical thinking through education and training. Available at: <http://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2016/05/30-31-eycs-conclusions-developing-media-literacy> (accessed June 30, 2016).
6. Bogdanova, D. A. 2010. Internet-bezopasnost' (opyt Avstralii) [Internet-safety — Australian experience]. *Distantsionnoe i virtual'noe obuchenie* [Distant and Virtual Learning] 5:117–128.
7. The UK Department for education. Available at: <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-education> (accessed June 30, 2016).
8. The Education Resources Information Center. The United States Department of Education. Available at: <http://eric.ed.gov/?id=ED553014> (accessed June 30, 2016).
9. Federal'nyy gosudarstvennyy obrazovatel'nyy standart nachal'nogo obshchego obrazovaniya [Federal state educational standard of primary general education]. Available at: minobrnauki.ru/документы/922 (accessed June 30, 2016).
10. Primernaya osnovnaya obrazovatel'naya programma nachal'nogo obshchego obrazovaniya [Exemplary basic educational program of primary general education]. Available at: minobrnauki.ru/документы/922/файл/227/поор_noо_reestr.doc (accessed June 30, 2016).
11. Bogdanova, D. A. 2015. O traktovke ponyatiy “otkrytaya i predstavitel'stvo” pri-menitel'no k informatsionno-obrazovatel'noy srede [On the “open and representation” concepts interpretations with the reference to the information and educational environment]. *Information Technologies for the New School: 4th Conference (International) “Information Technologies for the New School” Proceedings*. 3:104–107.

Received July 14, 2016

Contributor

Bogdanova Diana A. (b. 1946)— Candidate of Science (PhD) in education, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation; d.a.bogdanova@mail.ru

ОБ АВТОРАХ

Агафонов Егор Сергеевич (р. 1981) — научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Адамович Игорь Михайлович (р. 1934) — кандидат технических наук, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Барзенков Александр Вадимович (р. 1992) — аспирант Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта

Белоусов Василий Владимирович (р. 1977) — кандидат технических наук, заведующий сектором Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Богданова Диана Александровна (р. 1946) — кандидат педагогических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Власова Светлана Александровна (р. 1960) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук

Волков Олег Игоревич (р. 1964) — ведущий программист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Александр Александрович (р. 1946) — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Николай Александрович (р. 1982) — кандидат физико-математических наук наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

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

Забежайло Михаил Иванович (р. 1956) — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Института проблем информатики Феде-

рального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Захарова Татьяна Валерьевна (р. 1962) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

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, 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

Каленов Николай Евгеньевич (р. 1945) — доктор технических наук, профессор, директор Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук

Каменских Антон Николаевич (р. 1991) — аспирант, ассистент Пермского национального исследовательского политехнического университета

Кириков Игорь Александрович (р. 1955) — кандидат технических наук, директор Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Колесников Александр Васильевич (р. 1948) — доктор технических наук, профессор кафедры телекоммуникаций Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта; старший научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Корепанов Эдуард Рудольфович (р. 1966) — кандидат технических наук, заведующий сектором Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Королёв Вадим Иванович (р. 1943) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Петренко Евгений Владимирович (р. 1992) — аспирант Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта; ведущий программист Калининградского инновационного центра «Техноценоз»

Писковский Виктор Олегович (р. 1963) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Подлесный Матвей Михайлович (р. 1994) — студент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М. В. Ломоносова

Румовская София Борисовна (р. 1985) — программист 1-й категории Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Сергеев Игорь Викторович (р. 1965) — кандидат технических наук, заместитель директора Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Синицын Владимир Игоревич (р. 1968) — доктор физико-математических наук, доцент, заведующий отделом Института проблем информатики 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

Смирнов Дмитрий Владимирович (р. 1984) — бизнес-партнер по информационным технологиям департамента безопасности ПАО «Сбербанк России»

Степченков Юрий Афанасьевич (р. 1951) — кандидат технических наук, заведующий отделом 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

Тюрин Сергей Феофентович (р. 1953) — доктор технических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета

Шоргин Всеволод Сергеевич (р. 1978) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

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 сетей;
- методы и средства защиты информации.

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

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

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

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

Редакция 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 редакции о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам.

Редакция может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей высыпается 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 15 страниц указанного формата. При превышении указанного объема редколлегия вправе потребовать от автора сокращения объема рукописи.
Сокращения слов, помимо стандартных, не допускаются. Допускается минимальное количество аббревиатур.
Все страницы рукописи нумеруются.
Шаблоны примеров оформления представлены в Интернете:
<http://www.ipiran.ru/publications/collected/template.doc>
8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:
 - название статьи;
 - Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
 - место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
 - сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/collected/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/S1023193508080077.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Описание материалов конференций:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s 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 povysheniya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборника):

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:

Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. Vibration problems in engineering. — 4th ed. — 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:

Latyrov, 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 semanticeskogo 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 kolичества 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 (Сейфуль-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 15 pages of the specified format. If the specified size exceeded, the editorial board is entitled to require the author to reduce the manuscript.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site:

<http://www.ipiran.ru/publication/collected/template.doc>

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):
http://www.ipiran.ru/journal/collected/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.

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 primenением гидроразрыва пласта [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Books and other monographs:

Lindorf, L.S., and L.G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Dissertation and Thesis:

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya 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 86 92, 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 26 No.3 Year 2016

Editor-in-Chief and Chair of Editorial Council
Academician I. A. Sokolov

IN THIS ISSUE:

MATHEMATICAL SOFTWARE FOR SUBOPTIMAL NORMAL FILTERING
IN STOCHASTIC SYSTEMS WITH COMPLEX
FRACTION-RATIONAL NONLINEARITIES

*I. N. Sinitsyn, V. I. Sinitsyn, I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, V. V. Belousov,
V. S. Shorgin, and E. S. Agafonov*

4

SYMBOLIC ANALYTICAL MODELING OF NORMAL PROCESSES IN STOCHASTIC
SYSTEMS WITH COMPLEX FRACTION ORDER BESSEL NONLINEARITIES

I. N. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and V. V. Belousov

26

FAULT-TOLERANT SELF-TIMED SERIAL-PARALLEL PORT:
VARIANTS OF REALIZATION

Y. A. Stepchenkov, A. N. Kamenskih, S. F. Tyurin, and Y. G. Diachenko

48

PROTECTION OF BUSINESS LOGIC AGAINST ZERO DAY ATTACKS
A. A. Grusho and D. V. Smirnov

60

ARCHITECTURAL VULNERABILITIES OF DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS
A. A. Grusho, N. A. Grusho, E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin

74

SECURE AUTOMATIC RECONFIGURATION OF CLOUDY COMPUTING
A. A. Grusho, M. I. Zabezhailo, A. A. Zatsarinnyy, and V. O. Piskovski

83

CONCEPTUAL MODEL OF VIRTUAL HETEROGENEOUS COLLECTIVE
FOR SUPPORTING GROUP DECISION-MAKING

*I. A. Kirikov, A. V. Kolesnikov, S. B. Rumovskaya,
A. V. Barzenkov, and E. V. Petrenko*

93

MIXTURES OF NORMAL DISTRIBUTIONS IN THE PROBLEM
OF REFERENCE POINTS SEARCH USING MYOGRAMS

T. V. Zakharova and M. M. Podlesnyy

106