

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

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

Издается с 1989 года
Журнал выходит ежеквартально

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

академик РАН И. А. Соколов — главный редактор
профессор, д.ф.-м.н. С. Я. Шоргин — заместитель главного редактора
д.т.н. В. Н. Захаров проф., д.ф.-м.н. В. Ю. Королев
проф., д.т.н. В. Д. Ильин проф., д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков
проф., д.ф.-м.н. Л. А. Калиниченко проф., д.т.н. И. Н. Синицын
д.т.н. В. А. 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, 2015

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

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

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

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

Журнал «Системы и средства информатики»
включен в «Перечень российских рецензируемых журналов,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», утвержденный ВАК

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

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 25 № 2 Год 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое обеспечение моделирования нормальных процессов в стохастических системах со сложными иррациональными нелинейностями

- И. Н. Синицын, В. И. Синицын, И. В. Сергеев,
Э. Р. Корепанов, В. В. Белоусов, В. С. Шоргин** 3

Математическое обеспечение синтеза дискретных фильтров Пугачёва для обработки нормальных процессов в эредитарных стохастических системах

- И. Н. Синицын, И. В. Сергеев, В. И. Синицын,
Э. Р. Корепанов, В. В. Белоусов, В. С. Шоргин** 20

Исследование систем обслуживания с дискретным временем, входящим потоком авторегрессионного типа и обратной связью

- Н. Д. Леонтьев, В. Г. Ушаков** 60

Специализированная программная модель для имитации процесса передачи данных на транспортном уровне с использованием алгоритмов управления перегрузкой

- Е. О. Карпухин, В. В. Карнаков, С. В. Филиппов** 71

Новый метод получения устойчивого ключа из динамической биометрической подписи

- В. В. Кузнецов** 85

Гетерогенные интеллектуальные компьютерные системы поддержки принятия решений: модели координации и согласованности

- И. А. Кириков, А. В. Колесников, С. В. Листопад,
С. А. Солдатов** 96

Интернет-сервис планирования расходов

- А. В. Ильин** 111

Об одном подходе к автоматизации оценивания успеваемости студентов

- А. В. Босов, Е. С. Гресс, А. В. Наумов** 123

Информационные ресурсы контрастивных лингвистических исследований: электронные корпуса текстов

- М. Г. Кружков** 140

К 80-летию заслуженного деятеля науки Российской Федерации К. К. Колина

- И. А. Соколов, С. Н. Гринченко, А. А. Зацаринный,
И. М. Зацман, П. Г. Сибиряков** 160

Об авторах 165

Правила подготовки рукописей статей 168

Requirements for manuscripts 172

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СО СЛОЖНЫМИ ИРРАЦИОНАЛЬНЫМИ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ*

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

Аннотация: Рассмотрено методическое обеспечение аналитического и статистического моделирования нормальных стохастических процессов (СтП) в дифференциальных и разностных (дискретных) стохастических системах (СтС) на многообразиях со сложными иррациональными нелинейностями (СИРН) скалярного и векторного аргумента. Приведены типовые СИРН и их разложения по невязкам. Даны уравнения метода нормальной аппроксимации (МНА) и метода статистической линеаризации (МСЛ) для аналитического моделирования нестационарных и стационарных нормальных процессов. Рассматриваются методы вычисления типовых интегралов для СтС с СИРН на основе цилиндрических функций. Обсуждается состав алгоритмического обеспечения на основе МНА (МСЛ) и структура модуля «StS-CIRN.Analysis». Приведены тестовые примеры.

Ключевые слова: аналитическое и статистическое моделирование; метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); многочлены Эрмита; модуль «StS-CIRN.Analysis»; сложные иррациональные нелинейности (СИРН); стохастические системы (СтС); цилиндрические функции

DOI: 10.14357/08696527150201

*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, ekorepanov@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

1 Введение

Вопросам моделирования нормальных (гауссовских) СтП в нелинейных СтС (в том числе на многообразиях) на основе МНА и МСЛ посвящена обширная литература (см. обзоры [1–5]).

В [6, 7] дано развитие МНА (МСЛ) для СтС со сложными конечными, дифференциальными и интегральными нелинейностями. В [8] рассмотрены вопросы моделирования нормальных СтП в дифференциальных СтС с СИРН на многообразиях.

Статья посвящена математическому обеспечению моделирования нормальных СтП в дифференциальных и дискретных СтС с СИРН на многообразиях для модуля «StS-CIRN.Analysis» библиотеки «StS-Analysis» в среде MATLAB.

Статья состоит из введения, трех разделов и заключения. В разд. 2 рассматриваются типовые СИРН скалярного и векторного аргумента и их аналитические представления, а также разложения СИРН по невязкам. Раздел 3 посвящен математическому обеспечению моделирования нормальных СтП в дифференциальных СтС с СИРН на многообразиях. В разд. 4 обсуждается математическое обеспечение разностных (дискретных) СтС. Приложение содержит тестовые примеры для модуля «StS-CIRN.Analysis».

2 Сложные иррациональные нелинейности

Как известно [9, 10], скалярными иррациональными функциями $Z = \varphi_{\text{IR}}(Y, t)$ называются нелинейные функции, реализуемые с помощью операций сложения, вычитания, деления и извлечения корня. В составе модуля «StS-CIRN.Analysis» для СИРН используется запись

$$Z = \varphi_{\text{CIRN}}(Y, t). \quad (1)$$

Примерами детерминированных скалярных СИРН скалярного аргумента могут служить следующие:

$$\varphi_{\text{CIRN}}(Y, t) = \sum_{r=1}^n l_{rt} Y^{\alpha_r}; \quad (2)$$

$$\varphi_{\text{CIRN}}(Y, t) = \sum_{r=1}^n l_{rt} Y^{\alpha_r} \rho_r(Y); \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{CIRN}}(Y, t) = \frac{\sum_{r=1}^{n'} l'_{rt} Y^{\alpha'_r}}{\sum_{r=1}^{n''} l''_{rt} Y^{\alpha''_r}}; \quad (4)$$

$$\varphi_{\text{CIRN}}(Y, t) = \frac{\sum_{r=1}^{n'} l'_{rt} Y^{\alpha'_r} \rho'_r(Y)}{\sum_{r=1}^{n''} l''_{rt} Y^{\alpha''_r} \rho''_r(Y)}. \quad (5)$$

Здесь $\alpha, \alpha_r, \alpha'_r, \alpha''_r$ — нецелые числа; $\rho_r(Y), \rho'_r(Y), \rho''_r(Y)$ — структурные функции СИРН.

В качестве примеров скалярных СИРН векторного аргумента $Y = [Y_1 \cdots Y_p]^T$ рассмотрим следующие:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\text{CIRN}}(Y, t) &= \sum_{r=1}^n \prod_{j=1}^H l_{rh,t} Y^{\alpha_{rh}} \rho_j(Y); \\ \varphi_{\text{CIRN}}(Y, t) &= \frac{\sum_{r=1}^{n'} \prod_{j=1}^H l'_{rh,t} Y^{\alpha'_{rh}} \rho'_j(Y)}{\sum_{r=1}^{n''} \prod_{j=1}^H l''_{rh,t} Y^{\alpha''_{rh}} \rho''_j(Y)}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Замечание 2.1. Для векторных и матричных СИРН формулы (2)–(6) имеют место для соответствующих компонент.

Замечание 2.2. Примерами стохастических СИРН (СтСИРН) могут служить функции (2)–(6), в которых $l_{rt}, l'_{rt}, l''_{rt}, l_{rh,t}, l'_{rh,t}$ и $l''_{rh,t}$ являются случайными величинами (с.в.) $L_{rt}, L'_{rt}, L''_{rt}, L_{rh,t}, L'_{rh,t}$ и $L''_{rh,t}$ с известными распределениями, не зависящими от Y . В общем случае выражение для СтСИРН имеет вид:

$$Z = \Phi_{\text{CIRN}}(Y, t), \quad (7)$$

где $\Phi_{\text{CIRN}}(Y, t)$ — случайная функция Y и t . В практических задачах для гауссовских СтСИРН функции (8) аппроксимируют отрезками канонических разложений (КР) в некоторой области Δ_y согласно [3]. Расширяя вектор Y и \bar{Y} путем включения скалярных с.в. КР, придем к выражению для СтСИРН вида:

$$Z = \Phi_{\text{CIRN}}(Y, t) = \bar{\varphi}_{\text{CIRN}}(\bar{Y}, t).$$

Следуя [10], рассмотрим метод аппроксимации детерминированных СИРН, основанный на разложении СИРН по невязкам. Он допускает эффективные модификации для самых различных применений.

Пусть скалярная СИРН (1) записана в виде:

$$F(Y, Z, t) = Z - \varphi_{\text{CIRN}}(Y, t) = 0. \quad (8)$$

Введем невязку \bar{U} для (8)

$$\bar{U} = F(Y, \bar{Z}, t), \quad (9)$$

получающуюся при замене точного значения Z на приближенное \bar{Z} на заданном отрезке Δ_y . Простейший способ разложения СИРН по невязкам состоит в том, что из уравнения невязки (9) определяется

$$Y = \bar{f}(\bar{U}, \bar{Z}, t), \quad (10)$$

а из (10) находится искомая функция

$$\varphi_{\text{CIRN}}(Y, t) = \varphi_{\text{CIRN}}(\bar{f}(\bar{U}, \bar{Z}, t), t).$$

При соответствующем выборе структуры невязки (9) СИРН удовлетворяет следующему функциональному уравнению:

$$\varphi_{\text{CIRN}} = \varphi_{\text{CIRN}}(\bar{Y}) * \varphi_*(\bar{U}).$$

Здесь $\bar{Y} = \varphi_{\text{CIRN}}^{-1}(\bar{Z})$; $\varphi_{\text{CIRN}}^{-1}(\bar{Z})$ — обратная функция; $*$ — знак арифметической операции; $\varphi_*(\bar{U})$ определяется на основе тождества $\varphi_*(\bar{U}) = \varphi_{\text{CIRN}}(\bar{U})$.

Аналогично рассматривается невязка для векторных и матричных СИРН.

В модуле «StS-CIRN.Analysis» реализованы разложения СИРН по незвязкам на основе [11]:

- 1) одно- и двуточечной формул Тейлора–Маклорена;
- 2) аппроксимации Паде;
- 3) отличных от 1) и 2) нелинейных аппроксимаций, а также итерационных формул, допускающих символьную реализацию.

Особое внимание в модуле удалено степенным разложениям, а также многочленам Эрмита скалярного и векторного аргумента [11].

Замечание 2.3. Для СтСИРН аппроксимации согласно методам 1–3 являются стохастическими. Поэтому оценки точности [10] в «StS-CIRN.Analysis» выражены в терминах вероятностных моментов первого и второго порядка [11].

Примеры даны в приложении.

3 Дифференциальные стохастические системы со сложными иррациональными нелинейностями. Математическое обеспечение

Как известно из [1, 2], уравнения конечномерных непрерывных нелинейных систем со стохастическими возмущениями путем расширения вектора состояния СтС могут быть записаны в виде следующего векторного стохастического дифференциального уравнения Ито:

$$dY_t = a(Y_t, t) dt + b(Y_t, t) dW_0 + \int_{R_0} c(Y_t, t, v) P^0(dt, dv), \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (11)$$

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 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 ; $\int \limits_{\Delta} dP^0(t, A)$ — центрированная пуассоновская мера, определяемая

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

В (11) принято: $\int \limits_{\Delta}$ — 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 $R_0 = R_0^q$ с выколотым началом. Начальное значение Y_0 представляет собой с.в., 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 .

В случае аддитивных нормальных (гауссовских) и обобщенных пуассоновских возмущений уравнение (11) имеет вид:

$$\dot{Y} = a(Y_t, t) + b_0(t)V, \quad V = \dot{W}, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (12)$$

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

Если предположить существование конечных вероятностных моментов второго порядка для моментов времени t_1 и t_2 , то уравнения МНА примут следующий вид [2, 3]:

— для характеристических функций:

$$\left. \begin{aligned} g_1^N(\lambda; t) &= \exp \left[i\lambda^T m_t - \frac{1}{2} \lambda^T K_t \lambda \right]; \\ g_{t_1, t_2}^N(\lambda_1, \lambda_2; t_1, t_2) &= \exp \left[i\bar{\lambda}^T \bar{m}_2 - \frac{1}{2} \bar{\lambda}^T \bar{K}_2 \bar{\lambda} \right], \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где

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

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

$$\left. \begin{array}{l} \dot{m}_t = a_1(m_t, K_t, t), \\ \dot{K}_t = a_2(m_t, K_t, t), \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} = K(t_1, t_2) a_{21}(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T, \quad K(t_1, t_1) = K_{t_1}. \end{array} \right\} \quad (14)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = a_1(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N a(Y_t, t); \\ a_2 = a_2(m_t, K_t, t) = a_{21}(m_t, K_t, t) + a_{21}(m_t, K_t, t)^T + a_{22}(m_t, K_t, t); \\ a_{21} = a_{21}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N a(Y_t, t) Y_t^0; \\ a_{22} = a_{22}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N \sigma(Y_t, t), \end{array} \right\} \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma(Y_t, t) &= b(Y_t, t) \nu_0(t) b(Y_t, t)^T + \int_{R_0^q} c(Y_t, t, v) c(Y_t, t, v)^T \nu_P(t, dv); \\ m_t &= M_{\Delta_y}^N Y_t; \quad Y_t^0 = Y_t - m_t; \\ K_t &= M_{\Delta_y}^N Y_0^0 Y_t^0; \quad K(t_1, t_2) = M_{\Delta_y}^N Y_{t_1}^0 Y_{t_2}^0; \end{aligned}$$

$M_{\Delta_y}^N$ — символ вычисления математического ожидания для нормальных распределений (13).

Для стационарных СтС нормальные стационарные СтП — если они существуют, то $m_t = \bar{m}$, $K_t = \bar{K}$, $K(t_1, t_2) = k(\tau)$ ($\tau = t_1 - t_2$), — определяются уравнениями [2, 3]:

$$\left. \begin{array}{l} a_1(\bar{m}, \bar{K}) = 0; \\ a_2(\bar{m}, \bar{K}) = 0; \\ \dot{k}_\tau(\tau) = a_{21}(\bar{m}, \bar{K}) \bar{K}^{-1} k(\tau); \quad k(0) = \bar{K} \quad (\forall \tau > 0); \\ k(\tau) = k(-\tau)^T \quad (\forall \tau < 0). \end{array} \right\} \quad (16)$$

При этом необходимо, чтобы матрица $a_{21}(\bar{m}, \bar{K}) = \bar{a}_{21}$ была асимптотически устойчивой.

В случае СтС (12) уравнения МНА переходят в уравнения МСЛ Казакова [2, 3], если принять

$$\left. \begin{aligned} a(Y_t, t) &= a_1(m_t, K_t) + k_1^a(m_t, K_t) Y_t^0; \\ b(Y_t, t) &= b_0(t); \quad \sigma(Y_t, t) = b_0(t)\nu(t)b_0(t)^T = \sigma_0(t); \\ k_1^a(m_t, K_t, t) &= \left[\left(\frac{\partial}{\partial m_t} \right) a_0(m_t, K_t, t)^T \right]^T; \\ \dot{m}_t &= a_1(m_t, K_t, t), \quad m_0 = m(t_0); \\ \dot{K}_t &= k_1^a(m_t, K_t, t) K_t + K_t k_1^a(m_t, K_t, t)^T + \sigma_0(t), \quad K_0 = K(t_0); \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K(t_1, t_2) K_{t_2} k_1^a(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T, \quad K(t_1, t_2) = K_{t_1}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Для стационарных СтС (12) при условии асимптотической устойчивости матрицы $k_1^a(\bar{m}, \bar{K})$ в основе МСЛ лежат уравнения (16), записанные в виде

$$\left. \begin{aligned} a_1(\bar{m}, \bar{K}) &= 0; \\ k_1^a(\bar{m}, \bar{K}) \bar{K} + \bar{K} k_1^a(\bar{m}, \bar{K})^T + \bar{\sigma}_0 &= 0; \\ k_\tau(\tau) &= k_1^a(\bar{m}, \bar{K}) k(\tau); \quad k(0) = \bar{K} \quad (\forall \tau > 0); \\ k(\tau) &= k(-\tau)^T \quad (\forall \tau < 0). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Уравнения (13) и (14) лежат в основе МНА для СтС (11), а уравнения (17) — в основе МСЛ для СтС (12). Для определения стационарных СтП согласно МНА служат соотношения (16), а МСЛ — (18).

Замечание 3.1. Для СтС со стохастическими СИРН, когда a , b и c в (11) являются случайными функциями состояния Y и времени t

$$A = A(Y_t, t); \quad B = D(Y_t, t); \quad C = C(Y_t, t, v),$$

как показано в [8], необходимо аппроксимировать A , B и C отрезками канонических разложений по скалярным независимым нормальным с.в. с векторно-матричными коэффициентами Z^A , Z^B и Z^C и ввести расширенный вектор состояния $\bar{Y}_t = [Y_t^T \{Z^A\}^T, \{Z^B\}^T, \{Z^C\}^T]^T$, положив $dZ^A = 0$, $dZ^B = 0$, $dZ^C = 0$.

Как следует из уравнений (15), для МНА необходимо уметь вычислять следующие интегралы:

$$I_0^a = I_0^a(m_t, K_t, t) = a_1(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N a(Y_t, t); \quad (19)$$

$$I_1^a = I_1^a(m_t, K_t, t) = a_{21}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N a(Y_t, t) Y_t^{0T}; \quad (20)$$

$$I_0^{\bar{\sigma}} = I_0^{\bar{\sigma}}(m_t, K_t, t) = a_{22}(m_t, K_t, t) = M_N \bar{\sigma}(Y_t, t). \quad (21)$$

Для МСЛ достаточно вычислить интеграл (19), причем интеграл I_1^a вычисляется по формуле [2–4]:

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

В модуле «StS-CIRN.Analysis» для аналитического вычисления интегралов (19)–(21) используются методы, основанные на свойствах цилиндрических функций [8–10].

Для численных расчетов интегралов (19)–(21) в модуле «StS-CIRN.Analysis» были использованы многочленные приближения на основе рекуррентных соотношений для многочленов Эрмита [11].

Замечание 3.2. Важно иметь в виду, что 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 [5] представлены общие алгоритмы аналитического и статистического моделирования распределений, в том числе нормальных в нелинейных СтС на многообразиях. Алгоритмы аналитического, статистического моделирования для СтС с СИРН, а также смешанные алгоритмы различной степени точности относительно шага интегрирования представлены в [5].

В приложении приведены тестовые примеры для модуля «StS-CIRN.Analysis».

4 Дискретные стохастические системы со сложными иррациональными нелинейностями. Математическое обеспечение

Рассмотрим дискретную СтС с СИРН, описываемую уравнениями вида [2, 4]:

$$Y_{k+1} = a_k(Y_k) + b_k(Y_k) V_k^d \quad (k = 1, 2, \dots). \quad (22)$$

Здесь Y_k — $(p \times 1)$ -мерный вектор состояния, $Y_k \in \Delta_y$ (Δ_y — многообразие состояний); функции $a_k(Y_k)$ и $b_k(Y_k)$ имеют 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 (22) примет вид:

$$Y_{k+1} = a_k Y_k + b_{0k} V_k^d.$$

В основе МНА лежат следующие соотношения и уравнения [2, 4]:

$$\begin{aligned}
 g_{1k}^N(\lambda) &= \exp \left\{ i\lambda m_k - \frac{1}{2} \lambda^T K_k \lambda \right\}; \\
 g_{k_1 k_2}^N &= \exp \left\{ i\bar{\lambda}^T \bar{m}_2 - \frac{1}{2} \bar{\lambda}^T \bar{K}_2 \bar{\lambda} \right\}; \\
 m_{k+1} &= a_{1k} = M_{\Delta_y}^N a_k, \quad m_1 = M_{\Delta_y}^N Y_1; \\
 K_{k+1} &= a_{2k} = M_{\Delta_y}^N \left[a_k \ a_k^T \right] - \left[M_{\Delta_y}^N a_k \right] \left[M_{\Delta_y}^N a_k^T \right] + M_{\Delta_y}^N \left[b_k \nu_k^d b_k^T \right], \\
 K_1 &= M_{\Delta_y}^N Y_1^0 Y_1^{0T}; \\
 K(l, h) &= a_{3k} = M_{\Delta_y}^N Y_l^0 a_h (Y_h)^T, \quad K(l, l) = K_l \ (l < h); \\
 K(l, h) &= K(h, l)^T \ (l > h).
 \end{aligned} \tag{23}$$

В основе МСЛ для (23) после статистической линеаризации функции $a_k(Y_k)$ согласно

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

будут лежать уравнения [2, 4]:

$$\begin{aligned}
 m_{k+1} &= a_{0k}, \quad m(1) = m_1; \\
 K_{k+1} &= k_{1k}^a K_k (k_{1k}^a)^T + b_{0k} \nu_k^d b_{0k}^T, \quad K(1) = K_1; \\
 K(l, h+1) &= K(l, h) (k_{1h}^a)^T, \quad K(l, l) = K_l \ (l < h); \\
 K(l, h) &= K(h, l)^T \ (l > h).
 \end{aligned}$$

Для определения стационарных СтП согласно МНА и МСЛ с характеристиками

$$m_k = \bar{m}; \quad K_k = \bar{K}; \quad K(l, h) = \bar{k}(r) \ (r = h - l)$$

используется уравнение

$$\bar{m} = a_{1k} (\bar{m}, \bar{K}),$$

а также уравнения

$$\begin{aligned}
 \bar{K} &= a_{2k} (\bar{m}, \bar{K}); \\
 \bar{K} &= k_{1k}^a \bar{K} (k_{1k}^a)^T + b_{0k} \nu_k^d b_{0k}^T; \\
 \bar{k}(r+1) &= k(r) (k_1^a)^T, \quad \bar{k}(0) = \bar{K}.
 \end{aligned}$$

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

$$I_{0k}^a = I_{0k}^a(m_k, K_k) = M_{\Delta_y}^N a_k(Y_k); \quad (24)$$

$$I_{1k}^a = I_{1k}^a(m_k, K_k) = M_{\Delta_y}^N a_k(Y_k) Y_k^{0T}; \quad (25)$$

$$I_{0k}^\sigma = I_{0k}^\sigma(m_k, K_k) = M_{\Delta_y}^N \sigma(Y_k),$$

где $\sigma(Y_k) = b_k \nu_k^d b_k^T$.

Для МСЛ достаточно вычислить интеграл (24), причем интеграл (25) вычисляется по формуле:

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

Замечание 4.1. Аналогично разд. 3 рассматриваются МНА (МСЛ) для дискретных СтС, когда a_k и b_k в (22) являются случайными функциями Y_k и t .

5 Заключение

Представлено методическое обеспечение аналитического и статистического моделирования нормальных СтП в дифференциальных и разностных (дискретных) СтС на многообразиях с СИРН скалярного и векторного аргумента. Приведены типовые СИРН и их разложения по невязкам. Даны уравнения МНА и МСЛ для аналитического моделирования нестационарных и стационарных нормальных процессов. Рассмотрены методы вычисления типовых интегралов для СтС с СИРН на основе цилиндрических функций. Обсуждается состав алгоритмического обеспечения на основе МНА (МСЛ) для модуля «StS-CIRN.Analysis». Разработаны тестовые примеры.

Результаты допускают обобщение и развитие на случай, когда в уравнения СтС с СИРН входят автокоррелированные шумы, а также на случай операторных уравнений с СИРН.

Приложение

Тестовые примеры

Пример 1. Для функции $\varphi(Y) = \sqrt[n]{Y}$ невязка и ее степенное разложение имеют соответственно вид:

$$\bar{U} = Y (\bar{Z})^{-n} - 1; \quad |\bar{U}| \leq 1; \quad Z = \bar{Z} (1 + \bar{U})^{1/n} = \bar{Z} \left(1 + \frac{\bar{U}}{n} + \frac{1-n}{2!n^2} \bar{U}^2 + \dots \right).$$

Пример 2. Рассмотрим вычисление интегралов (19) и (20) для одномерной СИРН скалярного аргумента

$$\varphi(Y_t, t) = |Y_t|^{\alpha-1} \operatorname{sign} Y_t, \quad (26)$$

где α — нецелый показатель.

Пользуясь (17), представим (26) в виде:

$$\varphi(Y_t, t) = \varphi_0(m_t, D_t, t) + k_1^\varphi(m_t, D_t, t) Y_t^0.$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \varphi_0(m_t, D_t, t) &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \Gamma(\alpha) D_t^{(\alpha-1)/2} e^{-\xi_t^2/4} D_{-\alpha}(-\xi_t); \\ k_1^\varphi(m_t, D_t, t) &= \frac{\partial \varphi_0(m_t, D_t, t)}{\partial m_t} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \Gamma(\alpha) D_t^{(\alpha/2)-1} e^{-\xi_t^2/4} D_{1-\alpha}(-\xi_t), \end{aligned}$$

где $\Gamma(\alpha)$ — гамма-функция, $\xi_t = m_t/\sqrt{D_t}$ — отношение «сигнал–шум»; $D_{-\alpha}(\bar{\xi}_t)$ — функция параболического цилиндра [8]. При вычислении были учтены следующие соотношения [8]:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-\beta x^2 - \gamma x} dx &= (2\beta)^{-\alpha/2} \Gamma(\alpha) \exp\left(\frac{\gamma^2}{8\beta}\right) D_{-\alpha}\left(\frac{\gamma}{\sqrt{2\beta}}\right); \\ \frac{dD_\nu(z)}{dz} &= -\frac{z}{2} D_\nu(z) - D_{\nu-1}(z) = \frac{z}{2} D_\nu(z) - D_{\nu+1}(z), \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где $\operatorname{Re} \beta > 0$, $\operatorname{Re} \alpha > 0$, $\nu = -\alpha$.

Соотношения (27) могут быть использованы также для вычисления интегралов (19).

Применяя известное асимптотическое разложение для функции параболического цилиндра $D_\nu(z)$ [8]

$$D_\nu(z) \approx e^{-z^2/4} z^\nu \left[1 - \frac{\nu(\nu-1)}{2z^2} + \frac{\nu(\nu-1)(\nu-2)(\nu-3)}{2 \cdot 4 \cdot z^2} + \dots \right] \quad (|z| \gg 1, |z| \gg \nu),$$

придем к следующему асимптотическому выражению для $\varphi_0(\xi_t, D_t)$:

$$\begin{aligned} \varphi_0(\xi_t, D_t) &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \Gamma(\alpha) D_t^{(\alpha-1)/2} e^{-\xi_t^2/2} |\xi_t|^{-\alpha} \left[1 - \frac{\alpha(\alpha+1)}{2\xi_t^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\alpha(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)}{8\xi_t^4} + \dots \right] > 0. \end{aligned}$$

Пример 3. Для одномерной СИРН вида

$$\varphi(Y_t) = |Y_t|^{\alpha-1} \rho(Y_t)$$

имеем

$$\rho(Y) = 1(Y_k);$$

$$\varphi_0(\xi_t, D_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \Gamma(\alpha + 1) D_t^{\alpha/2} e^{-\xi_t^2/4} D_{-(\alpha+1)}(-\xi_t).$$

Замечание. Аналогично рассматриваются примеры, когда $\rho(Y) = \sin aY_t$ и $\rho(Y) = \cos aY_t$. В этом случае необходимо воспользоваться следующими интегралами [8]:

$$\int_0^\infty x^{\mu-1} e^{-\gamma x - \beta x^2} \sin ax dx = \frac{-i}{2(2\beta)^{\mu/2}} \exp \frac{\gamma^2 - a^2}{8\beta} \Gamma(\mu) \times$$

$$\times \left[\exp \left(-\frac{ia\gamma}{4\beta} \right) D_{-\mu} \left(\frac{\gamma - ia}{\sqrt{2\beta}} \right) - \exp \left(\frac{ia\gamma}{4\beta} \right) D_{-\mu} \left(\frac{\gamma + ia}{\sqrt{2\beta}} \right) \right];$$

$$\int_0^\infty x^{\mu-1} e^{-\gamma x - \beta x^2} \cos ax dx = \frac{1}{2(2\beta)^{\mu/2}} \exp \frac{\gamma^2 - a^2}{8\beta} \times$$

$$\times \left[\exp \left(-\frac{ia\gamma}{4\beta} \right) D_{-\mu} \left(\frac{\gamma - ia}{\sqrt{2\beta}} \right) + \exp \left(\frac{ia\gamma}{4\beta} \right) D_{-\mu} \left(\frac{\gamma + ia}{\sqrt{2\beta}} \right) \right].$$

Пример 4. Статистическая линеаризация одномерной СИРН двумерного аргумента $Y_t = [Y_{1t} \ Y_{2t}]^T$ для независимых нормальных Y_{it} ($i = 1, 2$) определяется следующими выражениями:

$$\varphi(Y_{1t}, Y_{2t}) = \varphi_0 + k_{11}^\varphi Y_1^0 + k_{12}^\varphi Y_2^0; \quad k_{1i}^\varphi = \frac{\partial \varphi_0}{\partial m_{it}} \quad (i = 1, 2).$$

Здесь φ_0 и k_{it}^φ зависят от m_{it} и D_{it} . Выражения для φ_0 в случаях примеров 2 и 3 получаются путем перемножения соответствующих выражений для Y_{it} . Аналогично рассматривается случай СИРН n -мерного аргумента ($n > 2$).

Пример 5. Пусть одномерная гауссовская стохастическая СИРН аппроксимирована согласно [3] отрезком канонического разложения

$$A(Y_t) = \sum_{j=1}^{n_j} L_j |Y_t|^{\alpha_j - 1} \operatorname{sign} Y_t,$$

где L_j — независимые между собой и от Y_t гауссовые с.в. с математическими ожиданиями m^{L_j} и дисперсиями D^{L_j} . Тогда МСЛ приводит к следующему представлению:

$$A(Y_t) = \varphi_0^A + k_1^A Y_t^0 + \sum_{j=1}^{n_j} k_1^{L_j} L_j^0.$$

Здесь коэффициенты φ_0^A , $k_1^{L_j}$ и k_1^A зависят от m_t^y , $m_t^{L_j}$, D_t^y и $D_t^{L_j}$ и вычисляются по формулам примера 2.

Аналогично рассматривается обобщение примера 3.

Пример 6. Для нелинейной одномерной дифференциальной СтС с СИРН вида

$$\dot{Y}_t = a_{0t} - a_t |Y_t|^{\alpha-1} \operatorname{sign} Y_t + b_t V$$

где α , a_t и b_t — коэффициенты; V — нормальный белый шум интенсивности ν_t , МСЛ приводит к следующим уравнениям:

$$\dot{m}_t = a_{0t} - a_t \varphi_0(m_t, D_t); \quad \dot{D}_t = -2a_t k_1^\varphi(m_t, D_t) + b_t^2 \nu_t.$$

Здесь φ_0 и k_1^φ определены, как в примере 2.

При $a_t = \bar{a} > 0$ имеет место стационарный режим, для которого $m_t = \bar{m}$ и $D_t = \bar{D}$ определяются из уравнений

$$\bar{a}_0 - \bar{a} \varphi_0(\bar{m}, \bar{D}) = 0, \quad -2\bar{a} k_1^\varphi(\bar{m}, \bar{D}) + \bar{b}^2 \bar{\nu} = 0.$$

Пример 7. Для одномерной дифференциальной СтС с СИРН и параметрическим шумом

$$\dot{Y}_t = a_{0t} - a_t Y_t + b_t (|Y_t|^{\delta-1} \operatorname{sign} Y_t) V$$

с учетом результатов примера 2 согласно МНА имеем:

$$\dot{m}_t = a_{0t} - a_t m_t; \quad \dot{D}_t = -2a_t D_t + b_t^2 \nu_t \varphi_0(m_t, D_t).$$

Здесь φ_0 определяется (23) при $\delta = 2\alpha - 1$.

Пример 8. Для некоторых типовых одномерных нелинейных дифференциальных СтС с СИРН

$$\dot{Y}_t = \psi(Y_t) + b_t V,$$

допускающих стационарный режим $m_t = \bar{m} = 0$, $D_t = \bar{D} \neq 0$, выражения для $\bar{\psi}_0 = \bar{\psi}_0(0, \bar{D})$ имеют соответственно вид:

$$\begin{aligned} \psi(Y_t) &= Y_t (Y_t^2 + d^2)^{-1/2}; \\ \bar{\psi}_0 &= \sqrt{\frac{\pi}{\mu}} e^{d^2 \mu} \left[1 - \tilde{\Phi}(d\sqrt{\mu}) \right]; \quad \tilde{\Phi}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt; \quad \mu = \frac{1}{2\bar{D}}; \\ \psi(Y_t) &= Y_t^{\alpha-1} \exp(-\gamma Y_t^{-2}); \quad \bar{\psi}_0 = 2 \left(\frac{\gamma}{\beta} \right)^{\alpha/4} K_{\alpha/2} \left(2\sqrt{\beta\gamma} \right), \end{aligned}$$

где $K_z(x)$ — цилиндрическая функция мнимого аргумента, $\beta = 1/(2\bar{D})$;

$$\psi(Y_t) = Y_t^{\mu-1} \sin \gamma Y_t, \quad \bar{\psi}_0 = \gamma e^{-\gamma^2/4\beta} \Gamma \left(\frac{1+\mu}{2} \right) {}_1F_1 \left(-\frac{\mu}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\gamma^2}{4\beta} \right),$$

где ${}_1F_1$ — вырожденная гипергеометрическая функция, $\beta = 1/\bar{D} > 0$, $\operatorname{Re} \mu > -1$;

$$\psi(Y_t) = Y_t^{\mu-1} \cos aY_t, \quad \bar{\psi}_0 = \frac{\Gamma(\mu/2)}{\beta^{\mu/2}} {}_1F_1\left(\frac{\mu}{2}; \frac{1}{2}; -\frac{a^2}{4\beta}\right),$$

где $\beta = 1/(2\bar{D})$, $\operatorname{Re} \mu > 0$, $a > 0$;

$$\begin{aligned} \psi(Y_t) &= Y_t^{2\mu-1} \operatorname{sh} \gamma Y_t, \\ \bar{\psi}_0 &= \Gamma(2\mu)(2\beta)^{-\mu} \exp\left(\frac{\gamma^2}{8\beta}\right) \left[D_{-2\mu}\left(-\frac{\gamma}{\sqrt{2\beta}}\right) - D_{-2\mu}\left(\frac{\gamma}{\sqrt{2\beta}}\right) \right], \end{aligned}$$

где $\beta = 1/(2\bar{D})$, $\mu > -0,5$;

$$\begin{aligned} \psi(Y_t) &= Y_t^{2\mu-1} \operatorname{ch} \gamma Y_t, \\ \bar{\psi}_0 &= \Gamma(2\mu)(2\beta)^{-\mu} \exp\left(\frac{\gamma^2}{8\beta}\right) \left[D_{-2\mu}\left(-\frac{\gamma}{\sqrt{2\beta}}\right) + D_{-2\mu}\left(\frac{\gamma}{\sqrt{2\beta}}\right) \right], \end{aligned}$$

где $\beta = 1/(2D)$, $\mu > 0$;

$$\psi(Y_t) = Y_t^{\nu-1} e^{\gamma/Y_t^2}, \quad \bar{\psi}_0 = 2 \left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^{\nu/4} K_{\nu/2}\left(2\sqrt{\beta\gamma}\right),$$

где $\beta = 1/\bar{D}$, $\operatorname{Re} \beta > 0$, $\operatorname{Re} \gamma > 0$.

Литература

1. Пугачев В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с. (Англ. пер. Pugachev V. S., Sinitsyn I. N. Stochastic differential systems. Analysis and filtering. — Chichester, NY, USA: Jonh Wiley, 1987. 549 р.)
2. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с. (Англ. пер. Pugachev V. S., Sinitsyn I. N. Stochastic systems. Theory and applications. — Singapore: World Scientific, 2001. 908 р.)
3. Синицын И. Н. Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. 768 с.
4. Синицын И. Н., Синицын В. И. Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации распределений в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
5. 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.
6. 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.

7. Синицын И. Н., Синицын В. И., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., 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.
8. 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.
9. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: ГИФМЛ, 1963. 1100 с.
10. Попов Б. А., Теслер Г. С. Вычисление функций на ЭВМ: Справочник. — Киев: Наукова Думка, 1984. 599 с.
11. Синицын И. Н., Синицын В. И., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Шоргин В. С. Руководство пользователя библиотеки «StS-ANALYSIS» (версия 1.0) / Под ред. И. Н. Синицына. — М.: ИПИ РАН, 2015. Препринт. 47 с.

Поступила в редакцию 28.01.15

MATHEMATICAL SOFTWARE FOR NORMAL PROCESSES MODELING IN STOCHASTIC SYSTEMS WITH COMPLEX IRRATIONAL NONLINEARITIES

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

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

Abstract: Mathematical software for normal stochastic processes (StP) analytical and statistical modeling in differential and difference (discrete) stochastic systems (StS) on manifolds with complex irrational nonlinearities (CIRN) of scalar and vector argument is considered. Typical CIRN and its discrepancy expansions are presented. Equations for the normal approximation method (NAM) and the statistical linearization method (SLM) for normal StP analytical modeling are given. Typical NAM (SLM) integrals and software “StS-CIRN. Analysis” based on cylindrical functions are discussed. Test examples are given.

Keywords: analytical and statistical modeling; complex irrational nonlinearity (CIRN); cylindrical functions; Hermite polynomials; module “StS-CIRN. Analysis;” normal approximation method (NAM); statistical linearization method (SLM)

DOI: 10.14357/08696527150201

Acknowledgments

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

References

1. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester, NY: Jonh Wiley. 549 p.
2. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
3. Sinitsyn, I. N. 2009. *Kanonicheskie predstavleniya sluchaynykh funktsiy i ikh prime-nenie v zadachakh komp'yuternoy podderzhki nauchnykh issledovaniy* [Canonical expansions of random functions and their application to scientific computer-aided support]. Moscow: TORUS PRESS. 768 p.
4. 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 of distributions in stochastic systems]. Moscow: TORUS PRESS. 488 p.
5. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Parametric statistical and analytical modeling of distributions in stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):4–16.
6. 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.
7. 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.
8. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, and E. R. Korepanov. 2014. Modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi irratsional'nymi nelineynostyami [Modeling of processes in stochastic systems with complex irrational nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(1):2–8.
9. Gradshteyn, I. S., and I. M. Ryzhik. 1963. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* [Tables of integrals, sums, series, and products]. Moscow: GIFML. 1100 p.
10. Popov, B. A., and G. S. Tesler. 1984. *Vychislenie funktsiy na EVM. Spravochnik* [Computing of functions]. Kiev: Naukova Dumka. 599 p.
11. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and V. S. Shorgin. 2015. *Rukovodstvo pol'zovatelya biblioteki “StS-ANALYSIS” (versiya 1.0)* [“StS-ANALYSIS” (version 1.0) Manual]. Ed. I. N. Sinitsyn. Moscow: IPI RAN. Preprint. 47 p.

Received January 28, 2015

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИНТЕЗА ДИСКРЕТНЫХ ФИЛЬТРОВ ПУГАЧЁВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ НОРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭРЕДИТАРНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*И. Н. Синицын¹, И. В. Сергеев², В. И. Синицын³, Э. Р. Корепанов⁴,
В. В. Белоусов⁵, В. С. Шоргин⁶*

Аннотация: Рассматриваются алгоритмы синтеза дискретных условно-оптимальных фильтров Пугачёва (ФП) для обработки процессов в непрерывных и дискретных эредитарных стохастических системах (ЭСтС) с винеровскими и пуассоновскими возмущениями. Дан краткий обзор работ в области анализа и моделирования нормальных стохастических процессов (СтП) в ЭСтС. Отмечается, что для нелинейных ЭСтС алгоритмы условно-оптимальной фильтрации нормальных СтП в реальном масштабе времени допускают простую реализацию и обладают достаточной точностью для широкого круга задач прикладной информатики и управления. Представлены алгоритмы приведения уравнений непрерывных ЭСтС к дифференциальным и дискретным СтС. Описаны алгоритмы синтеза дискретных ФП для обработки нормальных СтП в непрерывных и дискретных ЭСтС. Приведены примеры с результатами тестирования модуля инструментального программного обеспечения «IDStS-Filtering» для ЭСтС в условиях детерминированных и стохастических ударных воздействий.

Ключевые слова: дифференциальная стохастическая система (ДСтС); линейный фильтр Калмана; линейный фильтр Пугачёва; математическое обеспечение; метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); модуль «IDStS-Filtering»; нормальный стохастический процесс (СтП); ударные воздействия; ударный импульс; фильтр Пугачёва; эредитарная (интегродифференциальная) стохастическая система (ЭСтС); MATLAB

DOI: 10.14357/08696527150202

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, isergeev@ipiran.ru

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

⁴Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ekorepanov@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

1 Введение

Как известно [1–6], ЭСтС, описываемые стохастическими интегродифференциальными уравнениями, используются в задачах аналитического и статистического моделирования СтП в них. Такие СтП, как правило, являются немарковскими.

Для ЭСтС с затухающей памятью путем соответствующей аппроксимации эредитарных ядер удается привести уравнения ЭСтС к дифференциальным СтС (ДСтС). В результате СтП в таких ДСтС становятся марковскими, поэтому появляется возможность использовать богатый опыт моделирования ДСтС [2–12]. Вопросам параметрического статистического и аналитического моделирования посвящены работы [7, 11, 13].

Если инструментальные программные средства моделирования процессов в ЭСтС достаточно развиты для широкого круга практических задач, то средств обработки информации в ЭСтС, тем более в реальном масштабе времени, практически нет.

В [14] приведен обзор работ по синтезу ФП для обработки СтП в ЭСтС, приводимых к ДСтС. Однако в практических задачах, связанных с оперативной обработкой существенно нестационарных СтП в ЭСтС, алгоритмы ФП даже при использовании подходов [15, 16] весьма громоздки.

Статья посвящена алгоритмам синтеза дискретных нормальных ФП для обработки СтП в ЭСтС в реальном масштабе времени в составе инструментального программного обеспечения «IDStS» в среде MATLAB. В качестве примеров рассмотрены задачи обработки информации в ЭСтС в условиях сложных ударных воздействий. В разд. 2 представлены алгоритмы приведения уравнений непрерывных ЭСтС к дифференциальному и дискретному СтС (теоремы 2.1–2.4). Раздел 3 содержит алгоритмы синтеза дискретных ФП для обработки нормальных СтП в ЭСтС (теоремы 3.1–3.5). В приложение вынесены четыре примера с результатами тестирования модуля инструментального программного обеспечения «IDStS-Filtering» для ЭСтС в условиях детерминированных и стохастических ударных воздействий.

2 Эредитарные стохастические системы

Уравнения эредитарных стохастических систем. Следуя [4, 5], рассмотрим ЭСтС, описываемую интегродифференциальным уравнением Ито следующего вида:

$$dX = \left[a(X, \Theta, t) + \int_{t_0}^t a_1(X(\tau), \Theta, \tau, t) d\tau \right] dt +$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[b(X, \Theta, t) + \int_{t_0}^t b_1(X(\tau), \Theta, \tau, t) d\tau \right] dW_0 + \\
 & + \int_{R_0^q} \left[c(X, \Theta, t, v) + \int_{t_0}^t c_1(X(\tau), \Theta, \tau, t, v) \right] dP^0(t, dv) \quad (1)
 \end{aligned}$$

с начальным условием $X(t_0) = X_0$.

В (1) приняты следующие обозначения и допущения: $X = X(t)$ — n_x -мерный вектор состояния; Θ — n^Θ -мерный вектор случайных параметров, в общем случае зависящих от времени t ; \dot{W}_0 — r_x -мерный винеровский процесс интенсивности $\nu_0 = \nu_0(t)$; $\int dP^0(t, A)$ — центрированная пуассоновская мера, удовлетворяющая условию

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

где $\int_{\Delta} dP(t, A)$ — число скачков пуассоновского процесса в интервале Δ ; $\nu_P(t, A)$ — интенсивность пуассоновского процесса $P(t, A)$; v — q -мерный вспомогательный параметр; A — некоторое борелевское множество пространства R_0^q с выколотым началом.

Функции $a = a(X, \Theta, t)$, $a_1 = a_1(X(\tau), \Theta, \tau, t)$, $b = b(X, \Theta, t)$, $b_1 = b_1(X(\tau), \Theta, \tau, t)$, $c = c(X, \Theta, t, v)$ и $c_1 = c_1(X(\tau), \Theta, \tau, t, v)$ имеют соответственно размерности $n_x \times 1$, $n_x \times 1$, $n_x \times r_x$, $n_x \times r_x$, $n_x \times 1$ и $n_x \times 1$ и допускают представления вида:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= A(t, \tau)\varphi(X(\tau), \Theta, \tau); \\ b_1 &= B(t, \tau)\psi(X(\tau), \Theta, \tau); \\ c_1 &= C(t, \tau)\chi(X(\tau), \Theta, \tau, v). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь ядра $A(t, \tau) = [A_{ij}(t, \tau)]$ ($i, j = \overline{1, n_x}$), $B(t, \tau) = [B_{il}(t, \tau)]$ ($i = \overline{1, n_x}$, $l = \overline{1, r_x}$) и $C(t, \tau) = [C_{ij}(t, \tau)]$ ($i, j = \overline{1, n_x}$) имеют соответственно размерности $n_x \times n_x$, $n_x \times r_x$ и $n_x \times n_x$ и удовлетворяют следующим условиям физической реализуемости и асимптотического затухания:

$$A_{ij}(t, \tau) = 0, \quad B_{il}(t, \tau) = 0, \quad C_{ij}(t, \tau) = 0 \quad \forall \tau > t; \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |A_{ij}(t, \tau)| d\tau < \infty; \quad \int_{-\infty}^{\infty} |B_{il}(t, \tau)| d\tau < \infty; \quad \int_{-\infty}^{\infty} |C_{ij}(t, \tau)| d\tau < \infty. \quad (4)$$

Нелинейные в общем случае функции $\varphi = \varphi(X(\tau), \Theta, \tau)$, $\psi = \psi(X(\tau), \Theta, \tau)$ и $\chi = \chi(X(\tau), \Theta, \tau, v)$ отражают нелинейные и параметрические свойства ЭСтС, зависят от τ и имеют размерности $n_x \times 1$, $n_x \times n_x$, $n_x \times 1$ соответственно.

В том случае, если эредитарные ядра удовлетворяют условиям

$$A_{ij}(t, \tau) = \tilde{A}_{ij}(u); \quad B_{il}(t, \tau) = \tilde{B}_{il}(u); \quad C_{ij}(t, \tau) = \tilde{C}_{ij}(u), \quad (5)$$

где $u = t - \tau$, говорят об ЭСтС со стационарным затуханием.

Важный класс эредитарных ядер представляют собой сингулярные (вырожденные) ядра, когда имеют место представления:

$$\left. \begin{aligned} A_{ij}(t, \tau) &= A_{ij}^+(t)A_{ij}^-(\tau); \\ B_{il}(t, \tau) &= B_{il}^+(t)B_{il}^-(\tau); \\ C_{ij}(t, \tau) &= C_{ij}^+(t)C_{ij}^-(\tau), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $i, l = \overline{1, n_x}$, $j = \overline{1, r_x}$.

В случае, когда подынтегральные функции $c(X, \Theta, t, v)$ и $c_1(X(\tau), \Theta, t, v)$ в (1) допускают представления

$$c(X, \Theta, t, v) = b(X, \Theta, t)c'(v); \quad c_1(X(\tau), \Theta, t, v) = b(X(\tau), \Theta, t)c'(\tau),$$

ЭСтС (1) приводится к виду:

$$\dot{X} = a(X, \Theta, t) + \int_{t_0}^t a_1(X(\tau), \Theta, \tau, t) + \left[b(X, \Theta, t) + \int_{t_0}^t b_1(X(\tau), \Theta, \tau, t) d\tau \right] V, \quad (7)$$

если принять

$$V = \dot{W}; \quad W(t) = W_0(t) + \int_{R_0^q}^{t_0} c'(v) P^0(t, dv).$$

Замечание 2.1. В некоторых случаях вводят расширенный вектор состояния $\bar{X} = [X^T \Theta^T]^T$ размерности $\bar{n} = n_x + n^\Theta$, тогда уравнение (1) совместно с уравнением формирующего фильтра для Θ приводится к уравнениям вида (1) или (7), но для расширенного вектора состояния, положив $\Theta = 0$.

Аппроксимация эредитарных ядер линейными обыкновенными дифференциальными уравнениями. Рассмотрим ЭСтС (1) при условиях (2)–(4). Будем считать, что эредитарные ядра $A(t, \tau)$, $B(t, \tau)$ и $C(t, \tau)$ удовлетворяют следующим линейным операторным уравнениям относительно $D = d/dt$:

$$\left. \begin{aligned} F^{At} A(t, \tau) &= H^{At} \delta(t - \tau); \\ F^{Bt} B(t, \tau) &= H^{Bt} \delta(t - \tau); \\ F^{Ct} C(t, \tau) &= H^{Ct} \delta(t - \tau); \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$A(t, \tau) = A'(t, \tau)^T (H^{A*\tau})^T; \quad A'(t, \tau)^T (F^{A*\tau})^T = I_h^A \delta(t - \tau);$$

$$B(t, \tau) = B'(t, \tau)^T (H^{B*\tau})^T; \quad B'(t, \tau)^T (F^{B*\tau})^T = I_h^B \delta(t - \tau);$$

$$C(t, \tau) = C'(t, \tau)^T (H^{C*\tau})^T; \quad C'(t, \tau)^T (F^{C*\tau})^T = I_h^C \delta(t - \tau).$$

Здесь $F^A, H^A, F^B, H^B, F^C, H^C$ — известные матричные дифференциальные операторы размерности $h_A \times h_A, h_B \times h_B, h_C \times h_C$ порядков $n_A, m_A, n_B, m_B, n_C, m_C$ ($n_A > m_A, n_B > m_B, n_C > m_C$) соответственно:

$$F^A = F^A(t, D) = \sum_{l=0}^{n_A} \alpha_l^A(t) D^l; \quad H^A = H^A(t, D) = \sum_{l=0}^{m_A} \beta_l^A(t) D^l;$$

$$F^B = F^B(t, D) = \sum_{l=0}^{n_B} \alpha_l^B(t) D^l; \quad H^B = H^B(t, D) = \sum_{l=0}^{m_B} \beta_l^B(t) D^l;$$

$$F^C = F^C(t, D) = \sum_{l=0}^{n_C} \alpha_l^C(t) D^l; \quad H^C = H^C(t, D) = \sum_{l=0}^{m_C} \beta_l^C(t) D^l;$$

индекс t у операторов означает, что оператор действует на функцию от t при фиксированном τ ; звездочкой обозначен символ сопряжения оператора; I_h^A, I_h^B и I_h^C — единичные ($h \times h$)-матрицы.

Введем h^A -, h^B - и h^C -мерные векторы инструментальных переменных по-средством соотношений:

$$U' = \int_{t_0}^t A(t, \tau) \varphi(X(\tau), \Theta, \tau) d\tau;$$

$$U'' = \int_{t_0}^t B(t, \tau) \psi(X(\tau), \Theta, \tau) d\tau;$$

$$U''' = \int_{t_0}^t C(t, \tau) \chi(X(\tau), \Theta, \tau, v) d\tau.$$

При этом инструментальные переменные будут удовлетворять следующим уравнениям:

$$\left. \begin{array}{l} F^A(t, D)U' = H^A(t, D)\varphi(X, \Theta, t); \\ F^B(t, D)U'' = H^B(t, D)\psi(X, \Theta, t); \\ F^C(t, D)U''' = H^C(t, D)\chi(X, \Theta, t, v). \end{array} \right\} \quad (9)$$

В результате придем к искомой ДСтС для расширенного вектора состояния $Z = [X^T Z_1'^T Z_1''^T Z_1'''^T]^T$ ($Z_1' = U'$; $Z_1'' = U''$; $Z_1''' = U'''$):

$$dZ = a_1^z(Z, \Theta, t) dt + b_1^z(Z, \Theta, t) dW_0 + \int_{R_0^q} c_1^z(Z, \Theta, t, v) dP^0(t, dv). \quad (10)$$

В подробной записи для случая $h_A = h_B = h_C = h$, $n_A = n_B = n_C = n$, $m_A = m_B = m_C = m$ функции $a_1^z = a_1^z(Z, \Theta, t)$, $b_1^z = b_1^z(Z, \Theta, t)$, $c_1^z = c_1^z(Z, \Theta, t, v)$ в (10) имеют следующий вид:

$$\left. \begin{array}{l} a_1^z = \begin{bmatrix} a(X, \Theta, t) + Z_1' \\ a'(t)Z_1' \\ a''(t)Z_1'' \\ a'''(t)Z_1''' \end{bmatrix}; \\ b_1^z = \begin{bmatrix} b(X, \Theta, t) + Z_1'' \\ b''(t)Z_1'' \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \\ c_1^z = \begin{bmatrix} c(X, \Theta, t, v) + Z_1''' \\ c'''(t)Z_1''' \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{array} \right\} \quad (11)$$

Входящие в (10) переменные и коэффициенты при условии существования обратных матриц $(\alpha_n^A)^{-1}$, $(\alpha_n^B)^{-1}$, $(\alpha_n^C)^{-1}$ допускают следующую запись:

$$\left. \begin{array}{l} Z_{j+1}' = \dot{Z}_j' - q_j'\varphi(X, \Theta, t); \\ Z_{j+1}'' = \dot{Z}_j'' - q_j''\psi(X, \Theta, t); \\ Z_{j+1}''' = \dot{Z}_j''' - q_j'''\chi(X, \Theta, t, v) \quad (j = \overline{1, (n-1)}); \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$a'(t) = \begin{bmatrix} I_h & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I_h & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I_h \\ -(\alpha_n^A)^{-1}\alpha_0^A - (\alpha_n^A)^{-1}\alpha_1^A \cdots - (\alpha_n^A)^{-1}\alpha_{n-1}^A \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$a''(t) = \begin{bmatrix} I_h & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I_h & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I_h \\ -(\alpha_n^B)^{-1} \alpha_0^B - (\alpha_n^B)^{-1} \alpha_1^B \cdots - (\alpha_n^B)^{-1} \alpha_{n-1}^B & & & \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$a'''(t) = \begin{bmatrix} I_h & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I_h & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I_h \\ -(\alpha_n^C)^{-1} \alpha_0^C - (\alpha_n^C)^{-1} \alpha_1^C \cdots - (\alpha_n^C)^{-1} \alpha_{n-1}^C & & & \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$\left. \begin{array}{l} q'_j = (\alpha_n^A)^{-1} \left[\beta_{n-j}^A - \sum_{i=0}^{j-1} \sum_{l=0}^{j-i} C_{n-j-l}^{n-j} \alpha_{n-j+i+l}^A q_i^{(l)} \right]; \\ q'_n = (\alpha_n^A)^{-1} \left[\beta_0^A - \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n-i} \alpha_{i+l}^A q_i^{(l)} \right]; \\ q''_j = (\alpha_n^B)^{-1} \left[\beta_{n-j}^B - \sum_{i=0}^{j-1} \sum_{l=0}^{j-i} C_{n-j-l}^{n-j} \alpha_{n-j+i+l}^B q_i^{''(l)} \right]; \\ q''_n = (\alpha_n^B)^{-1} \left[\beta_0^B - \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n-i} \alpha_{i+l}^B q_i^{''(l)} \right]; \\ q'''_i = (\alpha_n^C)^{-1} \left[\beta_{n-j}^C - \sum_{i=0}^{j-1} \sum_{l=0}^{j-i} C_{n-j-l}^{n-j} \alpha_{n-j+i+l}^C q_i^{'''(l)} \right]; \\ q'''_n = (\alpha_n^C)^{-1} \left[\beta_0^C - \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n-i} \alpha_{i+l}^C q_i^{'''(l)} \right]. \end{array} \right\} \quad (16)$$

Здесь $C_m^n = n!/(m!(n-m)!)$, индекс l при q'_j , q''_j и q'''_j означает, что суммирование проводится по всем индексам, исключая l .

Таким образом, справедливо следующее утверждение [2–4].

Теорема 2.1. Пусть эредитарные ядра $A(t, \tau)$, $B(t, \tau)$ и $C(t, \tau)$ в ЭСтС (1) удовлетворяют условиям (2)–(4) и (9), причем матрицы α_n^A , α_n^B и α_n^C в (13)–(15) обратимы, а функции φ , ψ и χ дифференцируемы достаточночное число раз. Тогда ЭСтС (1) приводится к ЭСтС (10) на основе (11)–(16).

Аппроксимация эредитарных ядер линейными интегральными уравнениями. Следуя [2–6], рассмотрим ЭСтС со стационарным затуханием, когда ядра

удовлетворяют условиям (5). Тогда вместо выполнения условия (4) достаточно потребовать, чтобы преобразования Лапласа ядер были бы рациональными функциями переменной s :

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \tilde{A}(u)e^{-su} du &= (F^A(s))^{-1} H^A(s); \\ \int_0^\infty \tilde{B}(u)e^{-su} du &= (F^B(s))^{-1} H^B(s); \\ \int_0^\infty \tilde{C}(u)e^{-su} du &= (F^C(s))^{-1} H^C(s). \end{aligned}$$

Здесь порядок матричных полиномов $H^i(s)$ равен m^i , а порядок полиномов $F^i(s)$ равен n^i , причем $n^i \geq m^i$ ($i = A, B, C$).

Для ЭСтС с нестационарными эредитарными ядрами применяются различные типы линейных интегральных преобразований, учитывающих аналитическую природу эредитарности [2–6, 12, 13].

Аппроксимация эредитарных ядер вырожденными ядрами. В том случае, когда выполнены условия (2)–(4), а функции φ , ψ и χ не дифференцируемы, целесообразна аппроксимация эредитарных ядер вырожденными ядрами (4). В этом случае имеют место следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \int_{t_0}^t A(t, \tau) \varphi(X(\tau), \Theta, \tau) d\tau &= A^+ Y'; \\ \int_{t_0}^t B(t, \tau) \psi(X(\tau), \Theta, \tau) d\tau &= B^+ Y''; \\ \int_{t_0}^t C(t, \tau) \chi(X(\tau), \Theta, \tau, v) d\tau &= C^+ Y'''; \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}' &= A^- \varphi; & Y'(t_0) &= 0; \\ \dot{Y}'' &= B^- \psi; & Y''(t_0) &= 0; \\ \dot{Y}''' &= C^- \chi; & Y'''(t_0) &= 0; \\ Z &= [X^T \ Y'^T \ Y''^T \ Y'''^T]^T; \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$dZ = a_2^z(Z, \Theta, t) dt + b_1^z(Z, t, \Theta, t) dW_0 + \int_{R_0^q} c_2^z(Z, \Theta, t, v) dP^0(t, dv), \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} a_2^z &= \begin{bmatrix} a(X, \Theta, t) + A^+ Y' \\ A^- \varphi \\ B^- \psi \\ C^- \chi \end{bmatrix}; \quad b_2^z = \begin{bmatrix} b(X, \Theta, t) + B^+ Y'' \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \\ c_2^z &= \begin{bmatrix} c(X, \Theta, t, v) + C^+ Y''' \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Таким образом, имеем следующий результат [2–4].

Теорема 2.2. Пусть эредитарные ядра $A(t, \tau)$, $B(t, \tau)$ и $C(t, \tau)$ в ЭСмС (1) удовлетворяют условиям (3), (4) и (6), а функции φ , ψ и χ не дифференцируемы по переменным состояния. Тогда ЭСмС (1) приводится к ДСмС (19) на основе (17) и (18). Аналогичная теорема устанавливается для ЭСтС (7).

Замечание 2.2. Аналогично рассматривается случай, когда вырожденные ядра в ЭСтС определяются формулами (8).

Дискретные уравнения эредитарных стохастических систем. Уравнения ЭСмС (1) при условиях теоремы 2.1 и функциях φ , ψ и χ , допускающих производные второго порядка с точностью до h^2 и $h^{3/2}$ (h — шаг интегрирования) в детерминированной и стохастической части могут быть заменены следующей эквивалентной стохастической дискретной системой уравнений [4–6] (теорема 2.3):

$$\bar{X}_{n+1} = \Phi_n(\bar{X}_n) + \Psi_n(\bar{X}_n, V_n^{(1)}) V_n, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} a'(X_t, t) &= a(X_t, t) + \int_{t_0}^t a(X_\tau, \tau) d\tau; \\ b'(X_t, t) &= b(X_t, t) + \int_{t_0}^t b(X_\tau, \tau) d\tau; \\ c'_i(X_t, t, v) &= c_i(X_t, t, v) + \int_{t_0}^t c_i(X_t, t, \tau, v) d\tau. \end{aligned}$$

Здесь приняты следующие обозначения и сокращения:

$$\begin{aligned}\Phi_n(\bar{X}_n) = & \bar{X}_n + \left[a'(\bar{X}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c'_j(\bar{X}_n, nh) v_{jn} \right] h + \\ & + \frac{1}{2} \left\{ a'_t(\bar{X}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c'_{jt}(\bar{X}_n, nh) v_{jn} + \left[a'_x(\bar{X}_n, nh)^T - \right. \right. \\ & \left. \left. - \sum_{j=1}^N c'_{jx}(\bar{X}_n, nh)^T v_{jn} \right] \left[a'(\bar{X}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c'_j(\bar{X}_n, nh) v_{jnt} \right] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{3} \left[a'_{xx}(\bar{X}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c'_{jxx}(\bar{X}_n, nh) v_{jn} \right] : \sigma(\bar{X}_n, nh) \right\} h^2;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Psi_{1n}(\bar{X}_n) = & b(\bar{X}_n, nh) + \\ & + \frac{1}{2} \left[a'_x(\bar{X}_n, nh)^T - \sum_{j=1}^N c'_j(\bar{X}_n, nh)^T v_{jn} \right] b'(\bar{X}_n, nh);\end{aligned}$$

$$\Psi_{in}(\bar{X}_n) = c'_{i-1}(\bar{X}_n, nh) + \left[\Delta_{i-1} a'_n - \sum_{j=1}^N \Delta_{i-1} c'_{jn} v_{jn} \right] h;$$

$$\begin{aligned}\Psi'_{1n}(\bar{X}_n, V_n^{(1)}) = & \\ = & \left\{ b'(\bar{X}_n, nh) + \left[a'(\bar{X}_n, nh)^T - \sum_{j=1}^N c'_j(\bar{X}_n, nh)^T v_{jn} \right] \frac{\partial}{\partial x} b'(\bar{X}_n, nh) + \right. \\ & \left. + V_{1n}^T b'(\bar{X}_n, nh)^T \frac{\partial}{\partial x} b'(\bar{X}_n, nh) \right\} h + \sum_{j=1}^N \Delta_j b'_n V_{j+1,n};\end{aligned}$$

$$\Psi'_{in}(\bar{X}_n, V_n^{(1)}) = \left\{ c'_{i-1,t}(\bar{X}_n, nh) + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + c'_{i-1,x} (\overline{X}_n, nh)^T \left[a' (\overline{X}_n, nh) - \sum_{j=1}^N c'_j (\overline{X}_n, nh) v_{jn} \right] \} h + \\
 & + c'_{i-1,x} (\overline{X}_n, nh)^T b' (\overline{X}_n, nh) V_{1,n} + \sum_{j=1}^N \Delta_j c'_{j-1,n} V_{j+1,n}; \\
 \Psi'_{1n} (\overline{X}_n) & = \frac{1}{2} [b'_{xx} (\overline{X}_n, nh) : \sigma (\overline{X}_n, nh)]; \\
 \Psi''_{in} (\overline{X}_n) & = \frac{1}{2} [c'_{i-1,x} (\overline{X}_n, nh) : \sigma (\overline{X}_n, nh)]; \\
 V_{1n} & = \Delta W_n = W_0 ((n+1)h) - W_0(nh); \\
 V_{in} & = \Delta P_{i-1,n} = P_{i-1}((n+1)h) - P_{i-1}(nh), \quad i = 2, \dots, N; \\
 V'_{1n} & = \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} dW_0(\tau); \\
 V''_{1n} & = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 dW_0(\tau); \\
 V'_{in} & = \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} dP_{i-1}^0(\tau), \quad i = 2, \dots, N+1; \\
 V''_{in} & = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 dP_{i-1}^0(\tau), \quad i = 2, \dots, N+1; \\
 P_i^0(t) & = P_i(t) - \int_0^t v_i(\tau) d\tau; \\
 V_n^{(1)} & = \left[V_{1n}^T V_{2n} \cdots V_{n+1} \right]^T; \\
 \Psi_n (\overline{X}_n, V_n^{(1)}) & = \left[\Psi_{1n} (\overline{X}_n) \Psi'_{1n} (\overline{X}_n, V_n^{(1)}) \Psi''_{1n} (\overline{X}_n) \cdots \right. \\
 & \quad \left. \cdots \Psi_{N+1,n} (\overline{X}_n) \Psi'_{N+1,n} (\overline{X}_n, V_n^{(1)}) \Psi''_{N+1,n} (\overline{X}_n) \right]; \\
 V_n & = \left[V_{1n}^T V_{1n}'^T V_{1n}''^T V_{2n}^T V_{2n}'^T V_{2n}''^T \cdots V_{N+1,n} V_{N+1,n}' V_{N+1,n}'' \right]^T;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_{in} &= v_i \left(nh + \frac{h}{2} \right), \quad i = 1, \dots, N; \\
 \Delta_i a'_n &= a' (\bar{X}_n + c'_i, nh) - a' (\bar{X}_n, nh); \\
 \Delta_i b'_n &= b' (\bar{X}_n + c'_i, nh) - b' (\bar{X}_n, nh); \\
 \Delta_j c'_{in} &= c'_i (\bar{Y}_n + c'_j, nh) - c'_i (\bar{X}_n, nh); \\
 [\varphi_{xx}(x, t) : \sigma_0(x, t)]_k &= \text{tr} [\varphi_{kxx}(x, t) \sigma_0(x, t)]; \\
 \sigma_0(x, t) &= b'(x, t) v_0(t) b'(x, t)^T.
 \end{aligned}$$

Математические ожидания случайных величин (с.в.) V'_{1n} и V''_{1n} равны нулю, случайный вектор $[V_{1n}^T \ V_{1n}'^T \ V_{1n}''^T]$ имеет нормальное распределение, а скалярные с.в. $V_{2n}, \dots, V_{N+1,n}$ — пуассоновские распределения с параметрами

$$\mu_{in} = \int_{nh}^{(n+1)h} \nu_{i-1}(\tau) d\tau = \nu_{i-1} \left(nh + \frac{1}{2} h \right) h, \quad (i = 2, \dots, N+1).$$

Тройки с.в. $V_{1n}, V'_{1n}, V''_{1n}, \dots, V_{N+1,n}, V'_{N+1,n}, V''_{N+1,n}$ независимы в силу независимости процессов $W_0(t), P_1(t), \dots, P_N(t)$ и того, что при различных n величины V_n независимы. Однако при любых данных i, n величины $V_{in}, V'_{in}, V''_{in}$ зависимы.

Ковариационные и взаимные ковариационные матрицы стохастических интегралов случайного вектора $[V_{in}^T \ V_{in}'^T \ V_{in}''^T]^T$ определяются формулами:

$$\begin{aligned}
 K_{1n,11} &= \mathbb{M}_N V_{1n} V_{1n}^T = \int_{nh}^{(n+1)h} v_0(\tau) d\tau \cong v_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \\
 K_{1n,12} &= \mathbb{M}_N V_{1n} V_{1n}'^T = \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{h} v_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{2} v_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \\
 K_{1n,13} &= \mathbb{M}_N V_{1n} V_{1n}''^T = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 v_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{3} v_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h; \\
 K_{1n,21} &= K_{1n,12}; \quad K_{1n,31} = K_{1n,13};
 \end{aligned}$$

$$K_{1n,23} = \mathbb{M}_N V_{1n} V_{1n}''^T = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^3 v_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{4} v_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h;$$

$$K_{1n,31} = K_{1n,13}; \quad K_{1n,32} = K_{1n,23};$$

$$K_{1n,33} = \mathbb{M}_N V_{1n}'' V_{1n}''^T = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^4 v_0(\tau) d\tau \cong \frac{1}{5} v_0 \left(nh + \frac{h}{2} \right) h.$$

Замечание 2.3. Практически целесообразно аппроксимировать стохастические интегралы от неслучайных функций в (20), определяющие величины V'_{in} и V''_{in} ($i = 2, \dots, N + 1$), с помощью аналога интегральной теоремы о среднем для стохастических интегралов:

$$V'_{in} = \int_{nh}^{(n+1)h} \frac{\tau - nh}{H} dP_{i-1}^0(\tau) \cong$$

$$\cong \left[\frac{\int_{nh}^{(n+1)h} ((\tau - nh)/h) v_{i-1}(\tau) d\tau}{\int_{nh}^{(n+1)h} v_{i-1}(\tau) d\tau} \right] \Delta P_{i-1,n} \cong \frac{1}{2} \Delta P_{i-1,n} = \frac{1}{2} V_{in};$$

$$V''_{in} = \int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 dP_{i-1}^0(\tau) \cong$$

$$\cong \left[\int_{nh}^{(n+1)h} \left(\frac{\tau - nh}{h} \right)^2 v_{i-1}(\tau) d\tau - \int_{nh}^{(n+1)h} v_{i-1}(\tau) d\tau \right] \Delta P_{i-1,n} \cong$$

$$\cong \frac{1}{3} \Delta P_{i-1,n} = \frac{1}{3} V_{in}, \quad i = 2, \dots, N + 1.$$

При статистическом моделировании системы с помощью теоремы 2.3 также не представляет трудностей моделировать с.в., распределенные по нормальному и пуассоновским законам. Легко видеть, что правая часть разностного уравнения (20) определена с точностью до h^2 в детерминированном (при данном \bar{X}_n) слагаемом $\Phi_n(\bar{X}_n)$ и с точностью до $h^{3/2}$ в случайном слагаемом $\Psi_n(\bar{X}_n, V_n^{(1)}) V_n$. Сохраняя в (20) члены с точностью до h^2 и $h^{3/2}$, придем к алгоритмам Эйлера.

Полученные разностные уравнения (20) можно использовать как при теоретических исследованиях, так и для численного интегрирования дифференциальных стохастических уравнений. При этом нужно знать распределение всех с.в., входящих в разностные уравнения. В данном случае разностные уравнения будут представлять собой так называемую сильную аппроксимацию стохастических дифференциальных уравнений [17–20]. При численном интегрировании такая аппроксимация нужна, когда требуется получать реализации процесса $X(t)$. Однако часто нет нужды в получении реализаций процесса, а достаточно иметь лишь оценки моментов или математических ожиданий каких-либо функций от значения СтП $X(t)$ в определенный момент. В таких случаях можно отказаться от использования точных распределений, входящих в разностные уравнения с.в., а заменить их какими-нибудь более простыми распределениями с теми же моментными характеристиками. Например, нормально распределенную скалярную величину с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D можно заменить дискретной с.в., принимающей два значения $\pm\sqrt{D}$ с вероятностями $1/2$. При замене с.в. на величины с более простыми распределениями разностное уравнение будет представлять собой слабую аппроксимацию дифференциального стохастического уравнения [17–20].

В ЭСтС, приведенных к виду ДСтС (10) для гладких функций φ , ψ и χ и ДСтС (19) для негладких функций φ , ψ и χ , используются уравнения (20) при $a' = a = \varphi$, $b' = b = \psi$, $c' = c = \chi$. В этом состоит **теорема 2.4**.

3 Дискретные фильтры Пугачёва для обработки нормальных процессов в эредитарных стохастических системах

Уравнения нелинейного дискретного фильтра Пугачёва. Пусть векторный дискретный СтП $Z_k = [X_k^T Y_k^T]^T$ определяется стохастическими разностными уравнениями нелинейной регрессии вида:

$$X_{k+1} = \omega_k(X_k, Y_k, V_k), \quad Y_k = \omega_{1k}(X_k, Y_k, V_k) \quad (k = 1, 2, \dots). \quad (21)$$

Здесь X_k — наблюдаемый n_x -мерный векторный дискретный случайный процесс (в общем случае расширенный вектор состояния); Y_k — наблюдаемый n_y -мерный дискретный СтП; V_k — дискретный n_v -мерный векторный белый шум с известной характеристической функцией $h_k = h_k(\rho)$; ω_k и ω_{1k} — известные векторные n_x - и n_y -мерные функции отмеченных переменных. Требуется оценить вектор состояния системы X_k в любой момент времени $k > 1$ по результатам наблюдения дискретного процесса Y_k в интервале времени $[l, k]$, $Y_1^k = \{Y_j, j = 1, \dots, k\}$.

Аналогично ставятся задачи оценивания дискретных СтП в ДСтС, описываемых уравнениями авторегрессии вида

$$\left. \begin{aligned} X_{k+1} &= \varphi_k(X_k, Y_k) + \psi_k(X_k, Y_k) V_k^d; \\ Y_k &= \varphi_{1k}(X_k, Y_k) + \psi_{1k}(X_k, Y_k) V_k^d. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Иногда целесообразно формально выделить дискретные шумы V_1^d и V_2^d в уравнениях состояния и наблюдения. В этом случае (22) приобретают вид соответственно для задач фильтрации и экстраполяции:

$$\left. \begin{aligned} X_{k+1} &= \varphi_k(X_k, Y_k) + \psi_k(X_k, Y_k) V_{1k}^d; \\ Y_k &= \varphi_{1k}(X_k, Y_k) + \psi_{1k}(X_k, Y_k) V_{2k}^d. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Замечание 3.1. Как известно [14, 21], общая формула для оптимальной средней квадратической (с.к.) оценки \hat{X}_k СтП X_k для СтС (21) имеет вид:

$$\hat{X}_k = M[X_u | Y_1^k] \quad (k = 1, 2, \dots). \quad (24)$$

При произвольных нелинейных функциях ω_k и ω_{1k} не удается получить замкнутую систему рекуррентных уравнений относительно с.к. оптимальной оценки $\hat{X}_k = M[X_k | Y_1^k]$ вектора состояния X_k системы (21) по результатам текущих наблюдений $Y_1^k = \{Y_i, i = 1, 2, \dots, k\}$, а также ковариационной матрицы $R_k = M[\tilde{X}_k \tilde{X}_k^T | Y_1^k]$ ошибки оценивания $\tilde{X}_k = \hat{X}_k - X_k$. Основная трудность связана с нахождением одномерных фильтрационных плотностей и характеристических функций.

Замечание 3.2. В [14] для нормальных дискретных СтС приведены точные уравнения регрессионного дискретного с.к. оптимального фильтра для уравнений (21) и (22). Применение такого подхода для негауссовых дискретных СтС (21) и (22) встречает серьезные трудности [14].

Один из эффективных приближенных подходов к синтезу дискретных условно-оптимальных ФП состоит в отказе от абсолютной оптимальности и ограничении оптимальными оценками для некоторых классов допустимых оценок, удовлетворяющих некоторым простым в реализации разностным уравнениям, которые могут быть вычислены на основе результатов наблюдений в масштабе реального времени. Главная трудность при синтезе дискретных ФП состоит в выборе класса допустимых дискретных фильтров. Обычно в практических задачах классом допустимых дискретных ФП считают множество фильтров, описываемых конечномерными разностными уравнениями с некоторыми неизвестными коэффициентами. В этом случае проблема оптимизации сводится к определению оптимальных значений всех неизвестных коэффициентов, которые в общем случае зависят от времени.

Первая особенность дискретного нелинейного условно оптимального оценивания заключается в том, что такое оценивание является многокритериальным, поскольку требуется минимизация $M[\hat{X}_k - X_k]^2$ для любого момента времени k

из некоторого интервала. Как известно, формула (24) дает абсолютно оптимальную оценку для любого момента времени k . Однако, ограничивая класс допустимых оценок, трудно надеяться на то, что получаемая таким образом оценка будет оптимальной для любого момента времени l . Ясно, что так будет всегда в линейном случае. Таким образом, надлежит воспользоваться известными парето-оптимальными оценками.

Второй особенностью дискретного нелинейного условно-оптимального оценивания является то, что оптимальные коэффициенты дискретных фильтров должны определяться в ходе проектирования фильтра только априорными данными без использования текущих наблюдений, как это имеет место в фильтрах Калмана (ФК) [14]. Данные текущих наблюдений используются лишь в процессе дискретной фильтрации при рекуррентном решении уравнений фильтра.

Поставим задачу найти условно-оптимальную оценку \hat{X}_k для любого момента времени k с.в. \hat{X}_k , используя наблюдения с.в. $Y_1^k = \{Y_1, \dots, Y_k\}$ в классе допустимых фильтров. Рассмотрим сначала систему нелинейных регрессионных уравнений (21). Определим класс допустимых фильтров, используя формулу

$$\hat{X}_k = AU_k$$

и разностное уравнение

$$U_{k+1} = \delta_k \zeta_k (Y_k, U_k) + \gamma_k. \quad (25)$$

Здесь A — некоторая постоянная $(n_x \times N)$ -матрица ранга n_x , $N \geq n_x$; ζ_k — некоторые известные так называемые структурные функции (в общем случае векторные функции размерности q); δ_k — произвольные $(N \times q)$ -матрицы коэффициентов фильтров; γ_k — произвольные $(N \times 1)$ -матрицы-столбцы смещений нуля. Каждому выбору значений δ_k и γ_k соответствует определенный допустимый фильтр, а все возможные значения δ_k и γ_k определяют класс допустимых фильтров для данных функций ζ_k . Различные последовательности функций $\{\zeta_k\}$ определяют различные классы допустимых фильтров. Каждому выбору $\{\zeta_k\}$ соответствует определенный класс допустимых фильтров.

Последовательность функций $\{\zeta_k\}$ в (25) может быть, в принципе, произвольной. Но точность фильтрации зависит от выбора $\{\zeta_k\}$. Таким образом, встает вопрос о рациональном выборе $\{\zeta_k\}$. Априори можно только сказать, что чем больше размерность структурных векторных функций ζ_k , тем выше точность фильтрации. Некоторые указания на то, как выбрать функции ζ_k , могут быть получены путем замены уравнений, определяющих субоптимальные оценки [14], соответствующими разностными уравнениями.

Следуя Пугачёву [14], примем за оптимальный такой допустимый фильтр, который минимизирует найденный в результате предыдущих шагов средний квадрат ошибки $M |\hat{X}_{k+1} - X_{k+1}|^2$ на каждом шаге (при каждом k) путем выбора δ_k , γ_k в (25) при данных значениях δ_h , $h \leq k$. Такой фильтр называется

дискретным условно-оптимальным или дискретным ФП. Значения δ_k и γ_k в (25), соответствующие условно-оптимальному фильтру, принимаются за оптимальные значения $\hat{\delta}_k, \hat{\gamma}_k$.

Уравнение (25) показывает, каким образом при определении допустимого фильтра используется в каждый момент времени ($k+1$) информация предыдущих результатов наблюдений Y_1, \dots, Y_k , а именно: эта информация реализуется через U_k . И только текущий результат наблюдения Y_k используется непосредственно при формировании оценки \hat{X}_{k+1} в момент времени k . Таково условие, при котором $\mathbb{M} |\hat{X}_{k+1} - X_{k+1}|^2$ минимизируется в каждый момент времени ($k+1$) условно-оптимальным фильтром. Таким образом, задача синтеза ФП сводится к нахождению оптимальных последовательностей $\{\delta_k\}$ в (25).

Ограничаваясь случаем прямого оценивания, когда $\hat{X}_k = U_k$, представим уравнения ФП в следующем виде [14, 21] (теорема 3.1):

$$\begin{aligned}\hat{X}_{k+1} &= \delta_k \zeta_k \left(\omega_{1k} \left(X_k, V_k^d \right), \hat{X}_k \right) + \gamma_k; \\ \gamma_k &= m_{k+1} - \delta_k \rho_k; \\ \delta_k &= D_k B_k^{-1}; \\ m_{k+1} &= \mathbb{M} \omega_{1k} \left(X_k, V_k^d \right); \\ \rho_k &= \mathbb{M} \zeta_k \left(\omega_{1k} \left(X_k, V_k^d \right), \hat{X}_k \right); \\ B_k &= \mathbb{M} \left[\zeta_k \left(\omega_{1k} \left(X_k, V_k^d \right), \hat{X}_k \right) + \rho_k \right] \zeta_k \left(\omega_{1k} \left(X_k, V_k^d \right), \hat{X}_k \right)^T; \\ D_k &= \mathbb{M} \left[\omega_k \left(X_k, V_k^d \right) - m_{k+1} \right] \zeta_k \left(\omega_{1k} \left(X_k, V_k^d \right), \hat{X}_k \right)^T.\end{aligned}\quad (26)$$

Для вычисления по формулам (26) достаточно знать совместное распределение X_k, \hat{X}_k и распределение V_k^d , которое по предположению известно. При этом имеем для характеристических функций рекуррентное уравнение

$$g_{1,k+1}(\lambda, \mu) = \mathbb{M} \exp \left\{ i\lambda^T \omega_k \left(X_k, V_k^d \right) + i\mu^T \left[\delta_k \zeta_k \left(\omega_{1k} \left(X_k, V_k^d \right), \hat{X}_k \right) + \gamma_k \right] \right\}$$

при начальном условии

$$g_{1,1}(\lambda, \mu) = \mathbb{M} \exp \left\{ i\lambda^T X_1 + i\mu^T \hat{X}_1 \right\}.$$

Применительно к уравнениям нелинейной авторегрессии (22) можно представить уравнения дискретного ФП в виде [14, 21] (теорема 3.2):

$$\hat{X}_{k+1} = \alpha_k \xi_k \left(\hat{X}_k \right) + \beta_k \eta_k \left(\hat{X}_k \right) Y_k + \gamma_k.$$

Здесь $\xi_k = \xi_k(\hat{X}_k)$ и $\eta_k = \eta_k(\hat{X}_k)$ — известные структурные функции фильтра; α_k , β_k и γ_k — коэффициенты фильтра;

$$\begin{aligned} \rho_k &= \left[\rho_1^{(k)\top} \rho_2^{(k)\top} \right]^\top ; \quad \rho_1^{(k)} = M\xi_k(\hat{x}_k) ; \quad \rho_2^{(k)} = M\eta_k(\hat{X}_k) \varphi_{1k}(X_k) ; \\ B_k &= \begin{bmatrix} \kappa_{11}^{(k)} & \kappa_{12}^{(k)} \\ \kappa_{21}^{(k)} & \kappa_{22}^{(k)} \end{bmatrix}, \quad \det |B_k| \neq 0 ; \\ \kappa_{11}^{(k)} &= M \left[\xi_k(\hat{X}_k) - \rho_1^{(k)} \right] \xi_k(\hat{X}_k)^\top ; \\ \kappa_{12}^{(k)} &= k_{21}^{(k)\top} = M \left[\xi_k(\hat{X}_k) - \rho_2^{(k)} \right] \varphi_{1k}(X_k)^\top \eta_k(\hat{X}_k)^\top ; \\ \kappa_{22}^{(k)} &= M \left[\eta_k(\hat{X}_k) \varphi_{1k}(X_k) - \rho_2^{(k)} \right] \varphi_{1k}(X_k)^\top \eta_k(\hat{X}_k)^\top + \\ &\quad + M\eta_k(\hat{X}_k) \psi_{1k}(X_k) v_k \psi_{1k}(X_k)^\top \eta_k(\hat{X}_k)^\top ; \\ D_k &= \begin{bmatrix} \kappa_{01}^{(k)} & \kappa_{02}^{(k)} \end{bmatrix} ; \quad \kappa_{01}^{(k)} = M[\varphi_k(X_k) - m_{k+1}] \xi_k(\hat{X}_k)^\top ; \\ \kappa_{02}^{(k)} &= M[\varphi_k(X_k) - m_{k+1}] \varphi_{1k}(X_k)^\top \eta_k(\hat{X}_k)^\top + \\ &\quad + M\psi_k(\hat{X}_k) v_k \psi_{1k}(X_k)^\top \eta_k(\hat{X}_k)^\top ; \\ m_{k+1} &= \rho_0^{(k)} ; \quad \rho_0^{(k)} = M\varphi_k(X_k) , \end{aligned}$$

где $MV_k^d = 0$, $MV_k^d V_k^{dT} = \nu_k^d$ — ковариация дискретного белого шума V_k^d . При этом матрица коэффициентов фильтра $\delta_k = [\alpha_k \beta_k]$ определяется уравнениями

$$\alpha_k \kappa_{11}^{(k)} + \beta_k \kappa_{21}^{(k)} = \kappa_{01}^{(k)} ; \quad \alpha_k \kappa_{12}^{(k)} + \beta_k \kappa_{22}^{(k)} = \kappa_{02}^{(k)}, \quad (27)$$

а вектор смещения γ_k — формулой

$$\gamma_k = \rho_0^{(k)} - \alpha_k \rho_1^{(k)} - \beta_k \rho_2^{(k)}. \quad (28)$$

Рекуррентное выражение для характеристической функции имеет вид [14]:

$$\begin{aligned} g_{1,k+1}(\lambda, \mu) &= M h_k \left(\psi_k(X_k)^\top + \lambda \psi_{1k}(X_k)^\top \eta_k(\hat{X}_k) \beta_k^\top \mu \right) \times \\ &\times \exp \left\{ i\lambda^\top \varphi_k(X_k) + i\mu^\top \left[\alpha_k \xi_k(\hat{X}_k) + \beta_k \eta_k(\hat{X}_k)^\top \varphi_{1k}(X_k) + \gamma_k \right] \right\}. \quad (29) \end{aligned}$$

Уравнения (27)–(29) определяют рекуррентный процесс вычисления $g_{1,k+1}$, α_{k+1} , β_{k+1} и γ_{k+1} по известным $g_{1,k}$, α_k , β_k и γ_k . Для начала необходимо задать $g_{1,1}(\lambda, \mu)$ с.в. X_1 и \hat{X}_1 .

Дискретные линейные фильтры Калмана и Пугачёва. За дискретный ФК Пугачёв принимал обычный одношаговый линейный предсказатель и также строил нелинейную дискретную условно-оптимальную фильтрацию, тогда как в западной литературе делают различие между алгоритмами фильтрации и одношаговыми предсказателями. Это просто разная трактовка понятия «фильтрация». В. С. Пугачёв считал, что при дискретной фильтрации невозможно в один и тот же момент времени k одновременно получать наблюдение и тут же (мгновенно в этот же момент времени) оценивать состояние. Поэтому, например, структуру линейного дискретного фильтра он записывал в следующей форме:

$$X_{k+1} = \alpha_k X_k + \beta_k Y_k + \gamma_k. \quad (30)$$

Таким образом получался либо ФП, либо «одношаговый предсказатель»

$$(X_k, Y_k) \xrightarrow{\text{прогноз}} X_{k+1},$$

который В. С. Пугачёв называл дискретным ФК.

В западной литературе (и Калман сам) записывают дискретную версию ФК «по определению», согласно которому в один и тот же момент времени k проводится наблюдение и тут же (мгновенно) оценивается состояние. Тогда уравнение для оценки имеет вид:

$$X_{k+1} = \bar{\alpha}_k X_k + \bar{\beta}_k Y_{k+1} + \bar{\gamma}_k. \quad (31)$$

Вследствие разницы записей (30) и (31) получаются разные уравнения для коэффициентов усиления α_k , β_k и γ_k фильтров. Это обстоятельство характерно только для дискретных СтС.

В основе синтеза дискретного линейного ФП для дискретных линейных СтС вида

$$X_{k+1} = a_k X_k + a_{k0} + \psi_k V^d; \quad Y_k = b_k X_k + b_{0k} + \psi_{1k} V_k^d \quad (32)$$

лежат следующие уравнения [14] (теорема 3.3):

$$\hat{X}_{k+1} = a_k \hat{X}_k + \beta_k Y_k + \gamma_k = a_k \hat{X}_k + a_{0k} + \beta_k (Y_k - b_k \hat{X}_k - b_{0k}); \quad (33)$$

$$\beta_k = (a_k R_k b_k^T + \psi_k v_k^d \psi_{1k}^T) (b_k R_k b_k^T + \psi_k v_k^d \psi_{1k}^T)^{-1}; \quad (34)$$

$$R_{k+1} = (a_k - \beta_k b_k) R_k a_k^T + (\psi_k - \beta_k \psi_{1k}) v_k^d \psi_k^T; \quad (35)$$

$$g_{1,k+1}(\mu) = h_k \left((\psi_{1k}^T \beta_k^T - \psi_k^T) \mu \right) g'_{1,k} \left(\alpha_k^T \mu \right).$$

Замечание 3.3. Дискретные линейные ФП, во-первых, проще ФК в алгоритмическом отношении, во-вторых, при одинаковой точности порядок ФП может быть меньше порядка ФК ($Q_{\text{ФК}} = n_k(n_k + 3)/2$). Уравнение дискретного линейного ФП для дискретных линейных СтС с параметрическими негауссовскими шумами получены в [14–16].

Дискретные нелинейные нормальные фильтры Пугачёва. Как показано в [14, 21], при обработке нормальных СтП посредством нелинейных нормальных ФП для определения апостериорного распределения в (21) применяют метод нормальной аппроксимации (МНА) или метод статистической линеаризации (МСЛ) в случае аддитивных шумов в (22), когда $\varphi_k(X_k, Y_k) = \varphi_k(X_k)$, $\varphi_{1k}(X_k, Y_k) = \psi_{1k}(X_k)$.

Если к уравнениям нормальной дискретной системы уравнений (23) при независимости функций φ_k , ψ_k , φ_{1k} и ψ_{1k} от Y_k применим МНА, то уравнения нормального ФП имеют вид [14, 21] (теорема 3.4):

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1} &= f_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) + \\ &\quad + h_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \left[Y_{k+1|k} - f_k^{(1)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \right]; \\ R_{k+1} &= \left\{ f_k^{(2)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) - \right. \\ &\quad \left. - h_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \left(\psi_{1,k} v_k^d \psi_{1,k}^T \right) h \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right)^T \right\} + \\ &\quad + \sum_{r=1}^{n_y} \rho_r \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \left[Y_{r,k+1} - f_{r,k}^{(1)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) \right]; \\ f_k &= f_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = \mathbb{M}_N [\varphi_k]; \\ f_k^1 &= f_k^{(1)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = \mathbb{M}_N [\varphi_{1,k}]; \\ h_k &= h_k \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = \mathbb{M}_N \left[x \varphi_{1k} (Y_k, x) + \psi_k v_k^d \psi_{1k}^T (Y_k, x) \right]; \\ f_k^{(2)} &= f_k^{(2)} \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = \mathbb{M}_N \left[\left(x - \hat{X}_{k+1|k} \right) \varphi_k (Y_k, x)^T + \right. \\ &\quad \left. + \varphi_k (Y_k, x) \left(x^T - \hat{X}_{k+1|k} \right) + \psi_k v_k^d \psi_{1k}^T (Y_k, x) \right]; \\ \rho_r &= \rho_r \left(\hat{X}_{k+1|k}, Y_k, R_{k+1|k} \right) = \mathbb{M}_N \left[\left(x - \hat{X}_{k+1|k} \right) \left(x^T - \hat{X}_{k+1|k}^T \right) + a_r (Y_k, x) + \right. \\ &\quad \left. + \left(x - \hat{X}_{k+1|k} \right) b_r (Y_k, x) \left(x^T - \hat{X}_{k+1|k}^T \right) + b_r (Y_k, x) \left(x^T - \hat{X}_{k+1|k}^T \right) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbb{M}_N [\bullet] &= [(2\pi)^{n_x} |R_{k+1|k}|]^{1/2} \times \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{\infty} (\bullet) \exp \left\{ \frac{-\left(x^T - \hat{X}_{k+1|k}^T \right) R_{k+1|k}^{-1} \left(x - \hat{X}_{k+1|k} \right)}{2} \right\} dx. \end{aligned}$$

Здесь a_r — r -й элемент матрицы строки $(\varphi_{1k}^T - \hat{\varphi}_{1k}^T) (\psi_{1k} v_k^d \psi_{1k}^T)^{-1}$; $b_r = [b_{1r} \cdots b_{n_x kr}]^T$, где b_{lr} — элемент l -й строки и r -го столбца матрицы $\psi_k v_k^d \psi_{1,k}^T (\psi_{1k} v_k^d \psi_{1,k}^T)^{-1}$.

В качестве начальных условий принимаются

$$\hat{X}_{1|1} = \hat{X}_1 = \mathbb{M}_N [X_1 | Y_1]; \quad R_{1|1} = R_1 = \mathbb{M}_N \left[(X_1 - X_1^0) (X_1 - X_1^{0T}) | Y_1 \right];$$

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

Если к уравнениям для дискретной системы с аддитивными шумами применим МСЛ, то нормальный ФП совпадает с нормальным квазилинейным субоптимальным фильтром [14, 21]. Поэтому для системы (22) при условиях

$$\begin{aligned} \varphi_k(X_k, Y_k) &= \varphi_k(X_k) \approx \varphi_{k0} - k_{1k}^\varphi m_k^x + k_1^\varphi X_k; \\ \varphi_{1k}(X_k, Y_k) &= \varphi_{1k}(X_k) \approx \varphi_{1k0} - k_{1k}^{\varphi 1} m_k^x + k_1^{\varphi 1} X_k; \\ \psi_k(X_k, Y_k) &= \psi_{k0}; \quad \psi_{1k}(X_k, Y_k) = \psi_{1k0} \end{aligned}$$

уравнения ФП имеют вид (32)–(35) (**теорема 3.5**), если принять

$$\begin{aligned} a_k &= k_{1k}^\varphi; \quad b_k = k_{1k}^{\varphi 1}; \quad a_{k0} = \varphi_{k0} - k_{1k}^\varphi m_k^x; \\ b_{k0} &= \varphi_{1k0} - k_{1k}^{\varphi 1} m_k^x; \quad \psi_k = \psi_{k0}; \quad \psi_{1k} = \psi_{1k0}, \end{aligned}$$

где φ_{k0} , k_{1k}^φ , φ_{1k} и $k_{1k}^{\varphi 1}$ — коэффициенты МСЛ нелинейных функций, зависящие от математических ожиданий m_k^x и ковариационной матрицы K_k^x . Они определяются из первого уравнения (32) и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} m_{k+1}^x &= a_k m_k^x + a_{0k}; \quad m_k^x = \mathbb{M}_N X_1; \\ K_{k+1}^x &= a_k K_k a_k^T + \psi_k v_k^d \psi_k^T; \quad K_1^x = \mathbb{M}_N X_1^0 X_1^{0T}. \end{aligned}$$

Замечание 3.4. В [14, 21] рассмотрено уравнение (22) при аддитивных, в том числе негауссовских, шумах и функциях φ_k , φ_{1k} , зависящих от X_k , Y_k , на основе МСЛ. В этом случае проводится МСЛ по совокупности переменных X_k , Y_k , а для вычисления коэффициентов МСЛ требуются m_k^x , m_k^y , K_k^x , K_k^y , K_k^{xy} . Последние получаются по формуле линейной теории дискретных систем для первого и второго уравнения (32).

4 Заключение

Разработаны алгоритмы и инструментальные программные средства в составе «IDStS» в виде модуля «IDStS-Filtering» в среде MATLAB для синтеза дискретных линейных, параметрических и нелинейных дискретных ФП для оперативной обработки нормальных процессов в ЭСтС с затухающей памятью.

Результаты апробации и решения тестовых примеров приведены в приложении.

Результаты допускают обобщение на случай дискретных ФП с памятью [14], а также ЭСтС, описываемых каноническими представлениями [8, 11, 21].

Приложение

Пример 1. Рассмотрим линейную ЭСтС второго порядка следующего вида [4–6]:

$$\ddot{X} + 2\varepsilon_0\omega_0 \int_0^t \dot{X}(\tau) e^{-\beta|t-\tau|} d\tau + \omega_0^2 \int_0^t X(\tau) e^{-\gamma|t-\tau|} d\tau = \sigma(t), \quad X_0 = 0.$$

Эта система приводится к ДСтС вида

$$\begin{aligned} \ddot{X}_1 &= X_2; & \dot{X}_2 &= -2\varepsilon_0\omega_0 Y_1 - \omega_0^2 Y_2 + \sigma(t); \\ \dot{Y}_1 &= -\beta Y_1 + X_2; & \dot{Y}_2 &= -\gamma Y_2 + X_1; \\ X_1(0) &= X_2(0) = Y_1(0) = Y_2(0) = 0. \end{aligned}$$

Проведем дискретизацию ДСтС способом Эйлера [8]:

$$\begin{aligned} X_1(t) &\rightarrow X_{1,k}; & X_2(t) &\rightarrow X_{2,k}; & Y_1(t) &\rightarrow Y_{1,k}; & Y_2(t) &\rightarrow Y_{2,k}; \\ \dot{X}_1(t) &\rightarrow \frac{X_{1,k+1} - X_{1,k}}{\Delta t}; & \dot{X}_2(t) &\rightarrow \frac{X_{2,k+1} - X_{2,k}}{\Delta t}; \\ \dot{Y}_1(t) &\rightarrow \frac{Y_{1,k+1} - Y_{1,k}}{\Delta t}; & \dot{Y}_2(t) &\rightarrow \frac{Y_{2,k+1} - Y_{2,k}}{\Delta t}, \end{aligned}$$

а затем преобразуем систему:

$$\begin{aligned} \frac{X_{1,k+1} - X_{1,k}}{\Delta t} &= X_{2,k}; & \frac{X_{2,k+1} - X_{2,k}}{\Delta t} &= -2\varepsilon_0\omega_0 Y_{1,k} - \omega_0^2 Y_{2,k} + \sigma(k\Delta t); \\ \frac{Y_{1,k+1} - Y_{1,k}}{\Delta t} &= -\beta Y_{1,k} + X_{2,k}; & \frac{Y_{2,k+1} - Y_{2,k}}{\Delta t} &= -\gamma Y_{2,k} + X_{1,k}. \end{aligned}$$

Помножим каждую строку на Δt , после чего перенесем из левой части системы в правую k -е компоненты:

$$\begin{aligned} X_{1,k+1} &= X_{1,k} + \Delta t X_{2,k+1}; \quad X_{2,k+1} = X_{2,k} - 2\varepsilon_0\omega_0\Delta t Y_{1,k} - \omega_0^2\Delta t Y_{2,k} + \Delta t\sigma(k\Delta t); \\ Y_{1,k+1} &= Y_{1,k} - \beta\Delta t Y_{1,k} + \Delta t X_{2,k}; \quad Y_{2,k+1} = -\gamma\Delta t Y_{2,k} + \Delta t X_{1,k}. \end{aligned}$$

Для удобства введем следующие обозначения. Вектор состояния обозначим

$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} X_{1,k+1} \\ X_{2,k+1} \\ Y_{1,k+1} \\ Y_{2,k+1} \end{bmatrix}.$$

В качестве ударного воздействия возьмем полусинусоидальный импульс с аддитивной и мультипликативной помехами:

$$\sigma(k\Delta t) = \begin{cases} \sigma_0 \left(1 + V_{1,k}^d\right) \sin\left(\frac{\pi}{\tau} k\Delta t\right) + V_{2,k}^d, & k\Delta t < \tau; \\ V_{2,k}^d, & k\Delta t > \tau, \end{cases}$$

где $V_{1,k}^d$ и $V_{2,k}^d$ — компоненты векторного дискретного белого шума.

Таким образом, можно записать исходную ЭСтС в следующем дискретном векторном виде:

$$X_{k+1} = a_k X_k + a_{k0} c_{10} V_k^d,$$

где

$$a_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2\varepsilon_0\omega_0\Delta t & -\omega_0^2\Delta t \\ 0 & \Delta t & -\beta\Delta t & 0 \\ \Delta t & 0 & -\gamma\Delta t & 1 \end{bmatrix}; \quad a_{k0} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta t\sigma_0 \left(\frac{\pi}{\tau} k\Delta t\right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$c_{10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \Delta t\sigma_0 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} k\Delta t\right) & \Delta t \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Предположим что наблюдения дискретны и описываются скалярным уравнением $Y_k = b_k X_k + b_0 + b_{1,k} V_k^d$, где матричные коэффициенты имеют следующие значения:

$$b_k = [1 \ 0 \ 0 \ 0]; \quad b_0 = 0; \quad b_{1k} = [0, 1 \ 0, 1].$$

Проведем вычислительный эксперимент на промежутке времени $t \in [0, 300]$, положив $h = \Delta t = 1$, $k = 0, \dots, 300$, $\omega_0 = \varepsilon_0 = 0,1$, $c_0 = 1$. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 1–4.

Выход: для линейной эредитарной системы компоненты ковариационной матрицы ошибки фильтрации позволяют идентифицировать вид ударного импульса. Видна структура полусинусоидального ударного импульса.

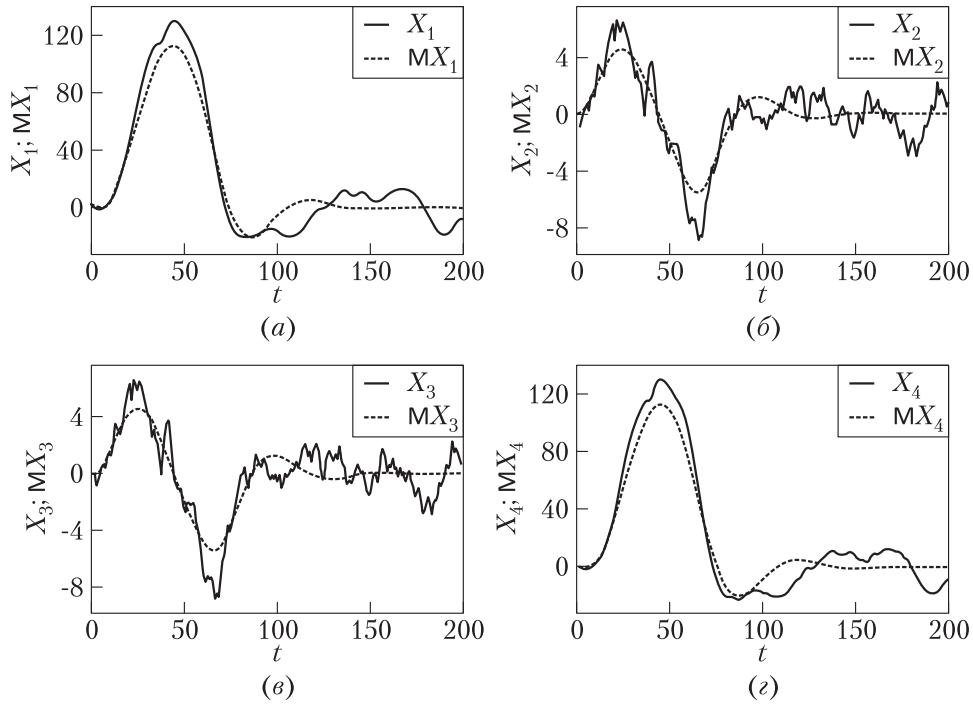


Рис. 1 Величина X_1 и математическое ожидание MX_1 (a); величина X_2 и математическое ожидание MX_2 (б); величина X_3 и математическое ожидание MX_3 (в); величина X_4 и математическое ожидание MX_4 (г)

Пример 2. Проведем вычислительный эксперимент для примера 1, но в качестве входного воздействия возьмем экспоненциальный импульс

$$\sigma(k\Delta t) = \begin{cases} \sigma_0 \left(1 + V_{1,k}^d\right) e^{-ak\Delta t} + V_{2,k}^d, & k\Delta t < \tau; \\ V_{2,k}^d, & k\Delta t > \tau. \end{cases}$$

Результаты вычислительного эксперимента показаны на рис. 5–8.

Вывод: для линейной эредитарной системы, как и в примере 1, компоненты ковариационной матрицы ошибки фильтрации позволяют идентифицировать вид ударного импульса. Видна структура экспоненциального ударного импульса.

Пример 3. В отличие от детерминированных ударных воздействий в примерах 1 и 2, рассмотрим стохастические ударные воздействия следующего вида:

$$\sigma(t) = \sigma_0 (1 + \xi(t)) \sin \frac{\pi t}{\tau} + A\eta(t) = \sigma_0 \sin \frac{\pi t}{\tau} + \left[\sigma_0 \sin \frac{\pi t}{\tau} A \right] \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \eta(t) \end{bmatrix} = \tilde{a} + \tilde{b}V$$

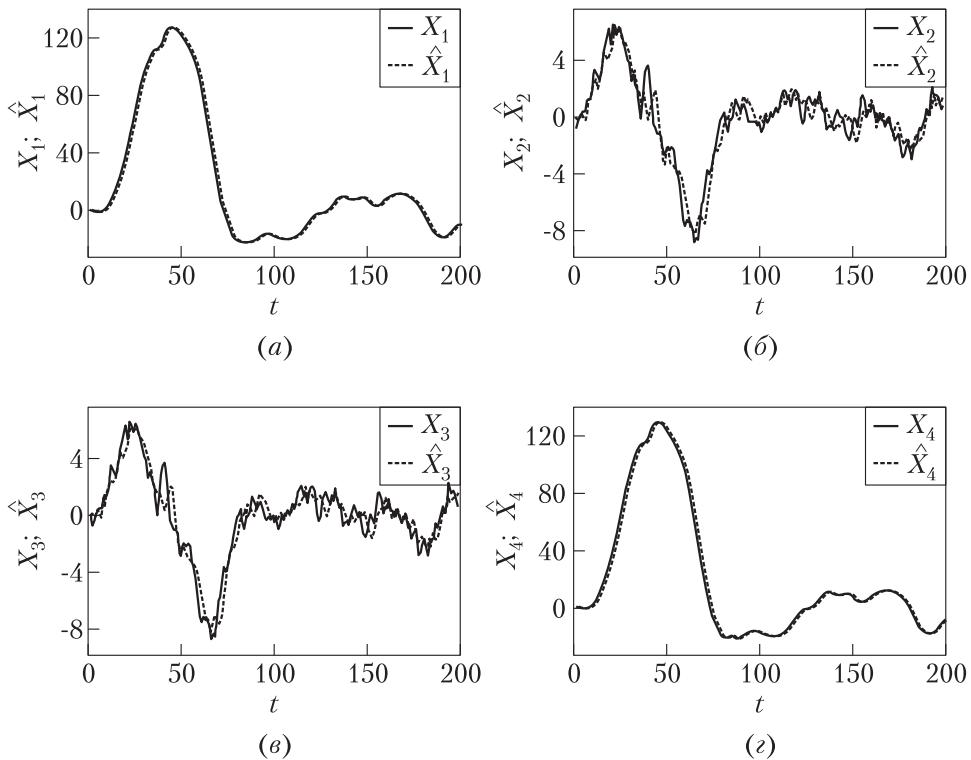


Рис. 2 Величина X_1 и оценка \hat{X}_1 (а); величина X_2 и оценка \hat{X}_2 (б); величина X_3 и оценка \hat{X}_3 (в); величина X_4 и оценка \hat{X}_4 (г)

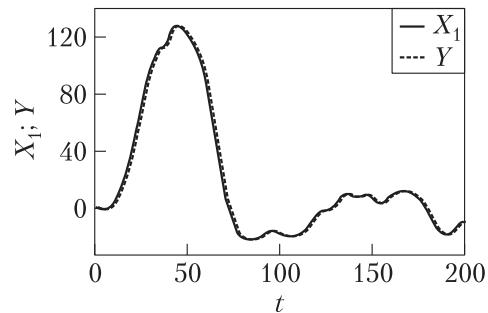


Рис. 3 Измеряемая величина X_1 и оценка Y

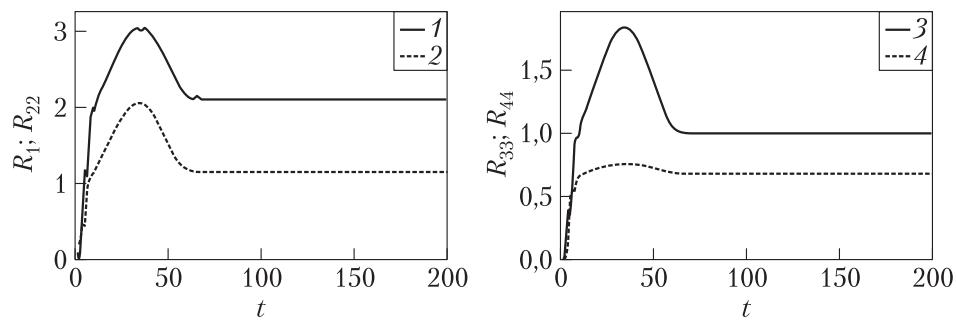


Рис. 4 Ошибки оценивания R_{11} (1), R_{22} (2), R_{33} (3) и R_{44} (4)

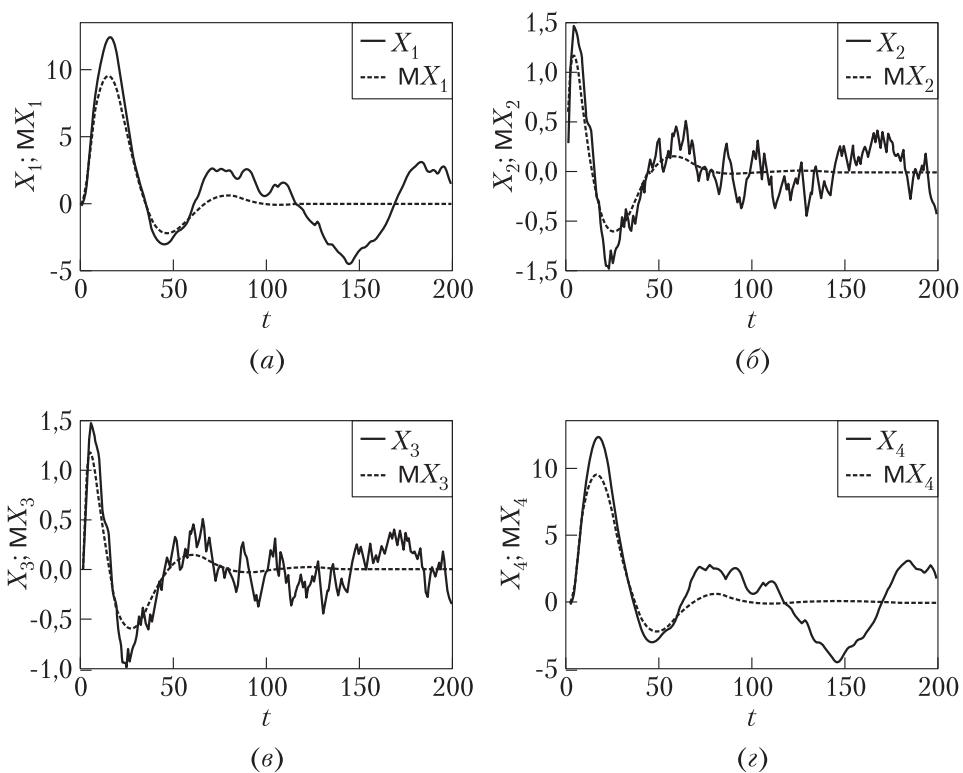


Рис. 5 Величина X_1 и математическое ожидание MX_1 (а); величина X_2 и математическое ожидание MX_2 (б); величина X_3 и математическое ожидание MX_3 (в); величина X_4 и математическое ожидание MX_4 (г)

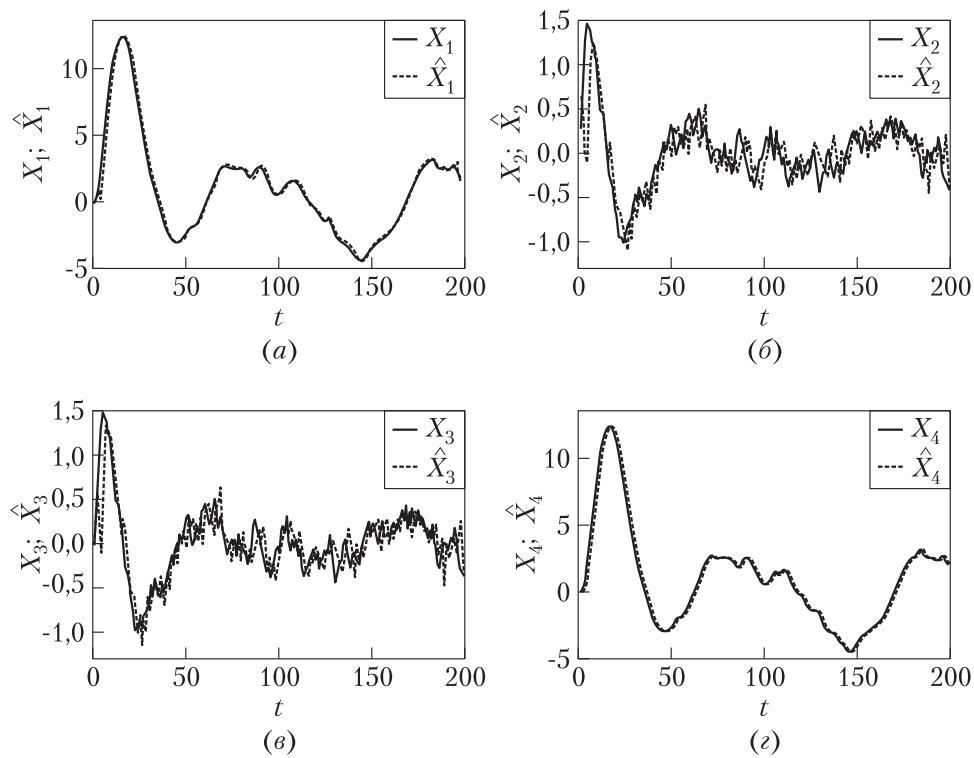


Рис. 6 Величина X_1 и оценка \hat{X}_1 (а); величина X_2 и оценка \hat{X}_2 (б); величина X_3 и оценка \hat{X}_3 (в); величина X_4 и оценка \hat{X}_4 (г)

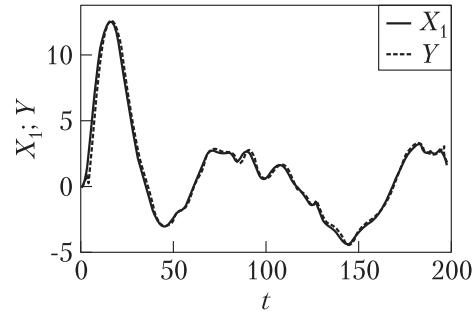


Рис. 7 Измеряемая величина X_1 и оценка Y

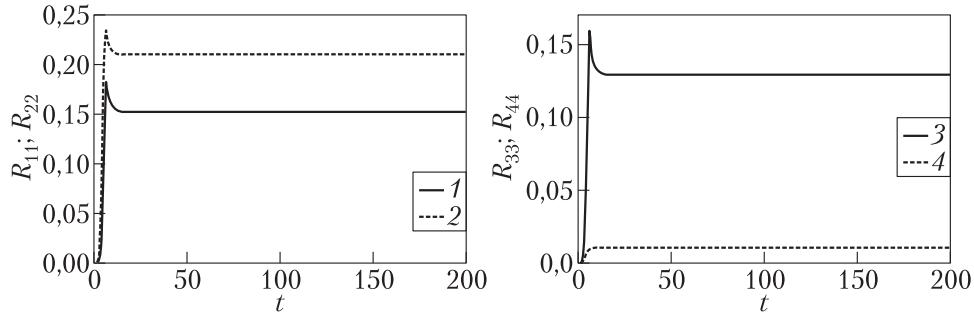


Рис. 8 Ошибки оценивания R_1 (1), R_{22} (2), R_{33} (3) и R_{44} (4)

и ударное воздействие вида

$$\sigma(t) = \sigma_0(1 + \xi(t))e^{-at} + A\eta(t) = \sigma_0 \sin \frac{\pi t}{\tau} + [\sigma_0 e^{-at} A] \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \eta(t) \end{bmatrix} = \tilde{a} + \tilde{b}V.$$

Рассмотрим линейную ЭСтС с параметрическими шумами в виде

$$a_3 \ddot{X} + a_2 \int_0^t \dot{X}(\tau) e^{-\beta|t-\tau|} d\tau + a_1 \int_0^t X(\tau) e^{-\gamma|t-\tau|} d\tau + a_0 + \\ + \left[b_3 X + \sum_{r=1}^2 b_r \int_0^t X(\tau) e^{-\gamma|t-\tau|} d\tau + b_0 \right] V = 0.$$

В результате придем к ДСтС вида:

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2; \\ a \dot{X}_2 &= a_2 Y_1 - a_1 Y_2 - a_0 - [b_2 X_1 + b_1 U_1 + b_2 U_2 + b_0] V; \\ \dot{Y}_1 &= -\beta Y_1 + X_2; \quad \dot{Y}_2 = -\gamma Y_2 + X_1; \\ \dot{U}_1 &= -\gamma_1 U_1 + X_1; \quad \dot{U}_2 = -\gamma_2 U_2 + X_1; \\ X_1(0) &= X_2(0) = Y_1(0) = Y_2(0) = U_1(0) = U_2(0) = 0. \end{aligned}$$

Перепишем эту систему в векторном виде:

$$\dot{\bar{X}}_t = \bar{a}_{1t} + \bar{a}_{0t} + \left(\bar{c}_3 + \sum_{r=1}^6 \bar{c}_{rt} \bar{X}_{rt} \right) \bar{V}_k,$$

где

$$\bar{a}_{1t} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{a_2}{a_3} & -\frac{a_1}{a_3} & 0 \\ 0 & 1 & -\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_2 \end{bmatrix}; \quad \bar{a}_{0t} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{a_0}{a_3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{c}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\bar{c}_{1t} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{c}_{5t} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{c}_{6t} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

а матрицы \bar{c}_{2t} , \bar{c}_{3t} и \bar{c}_{4t} — нулевые. Здесь матрицы \bar{c}_{r0} , $r = 1, \dots, 6$, имеют размерность 6×2 и скалярно умножаются на компоненты \bar{X}_{rt} вектора состояния системы.

Пусть $-a_0/a_3 = \tilde{a}$, $b_0 = \tilde{b}$, а b_1 , b_2 и b_3 — единичные матрицы. Пусть также $a_2/a_3 = 2\varepsilon_0\omega_0$, $a_1/a_3 = \omega_0^2$, при этом значения параметров ε_0 и ω_0 возьмем из примеров 1 и 2.

Проведем эйлерову дискретизацию уравнений ЭСтС

$$X_{k+1} = \bar{a}_k X_k + \bar{a}_{k0} + \left(\bar{c}_{10} + \sum_{r=1}^6 \bar{c}_{rk} \bar{X}_{kr} \right) \bar{V}_k^d,$$

где

$$\bar{a}_k = \bar{a}_1 h + I; \quad \bar{a}_{k0} = \bar{a}_0 h; \quad \bar{c}_{10} = \bar{c}_0 h; \quad \bar{c}_{rk} = \bar{c}_{1k} h;$$

$$\bar{V}_k^d \sim \mathcal{N}(0, \bar{G}_k); \quad \bar{G}_k = v_0(kh)h.$$

Предположим, что наблюдения дискретны и описываются уравнением $Y_k = b_k X_k + b_0 + b_{1k} V_k^d$, а матричные коэффициенты имеют следующие значения: $b_k = I$ — единичная матрица размерности 6×6 ; $b_0 = 0$ — нулевой вектор-столбец размерности 6×1 ; $b_{1k} = 0,1I$ — диагональная матрица размерности 6×6 . Результаты показаны на рис. 9–12.

Выход: для линейной эредитарной системы с параметрическими шумами ковариационная матрица ошибки фильтрации имеет характерный всплеск, наблюдающийся в момент удара.

Пример 4. Проведем вычислительный эксперимент для примера 3, где в качестве входного воздействия возьмем полусинусоидальный ударный импульс. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 13–16.

Выход: для линейной эредитарной системы с параметрическими шумами ковариационная матрица ошибки фильтрации имеет характерные всплески, наблюдающиеся в момент удара.

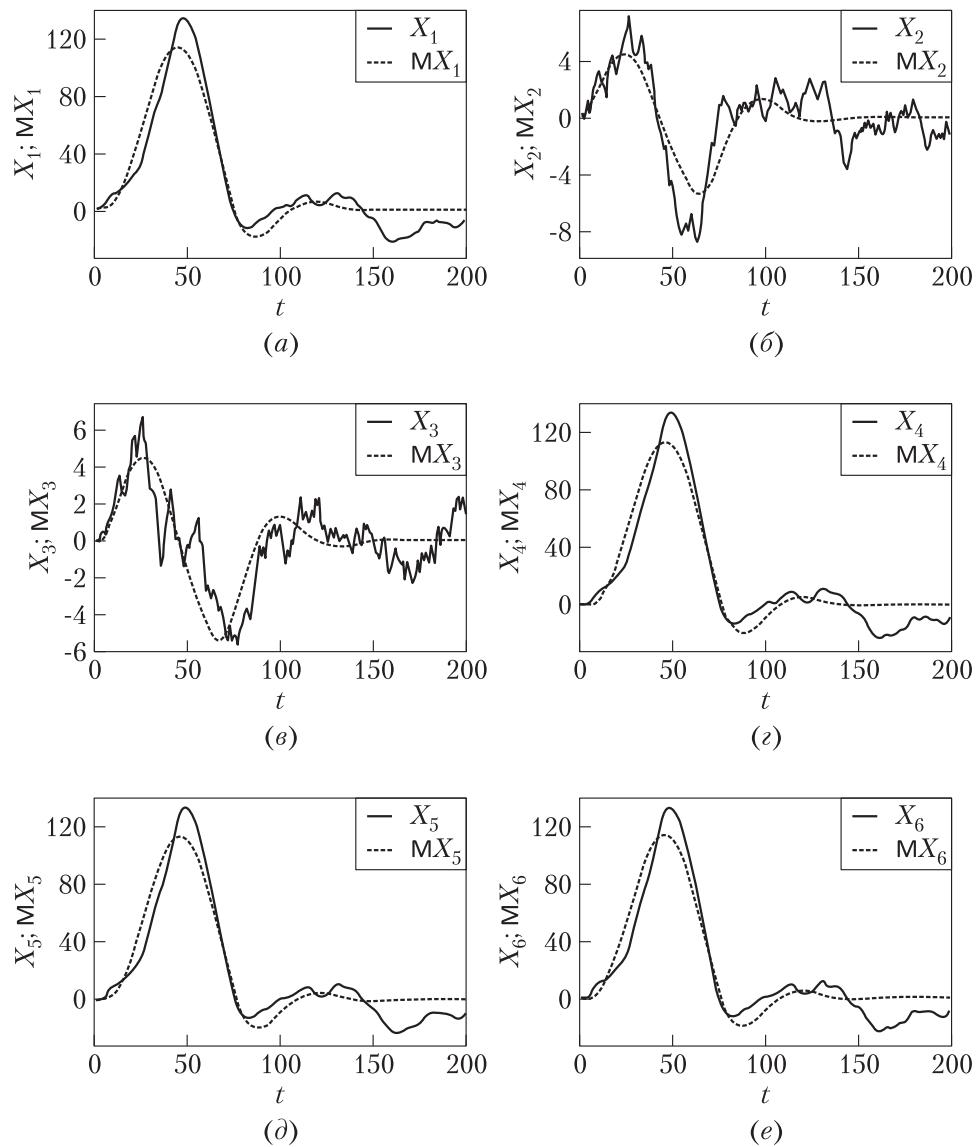


Рис. 9 Величина X_1 и математическое ожидание MX_1 (a); величина X_2 и математическое ожидание MX_2 (б); величина X_3 и математическое ожидание MX_3 (в); величина X_4 и математическое ожидание MX_4 (г); величина X_5 и математическое ожидание MX_5 (д); величина X_6 и математическое ожидание MX_6 (е)

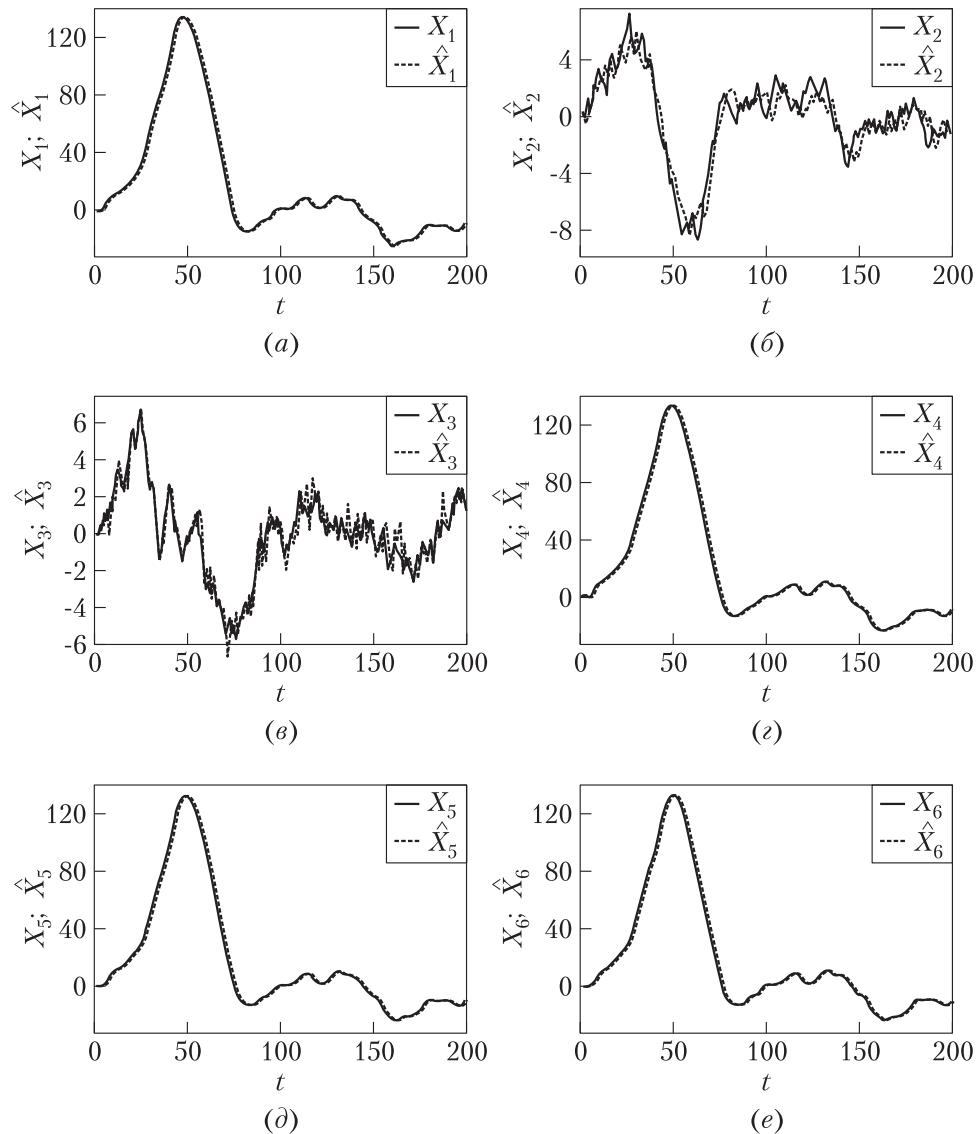


Рис. 10 Величина X_1 и оценка \hat{X}_1 (а); величина X_2 и оценка \hat{X}_2 (б); величина X_3 и оценка \hat{X}_3 (в); величина X_4 и оценка \hat{X}_4 (г); величина X_5 и оценка \hat{X}_5 (д); величина X_6 и оценка \hat{X}_6 (е)

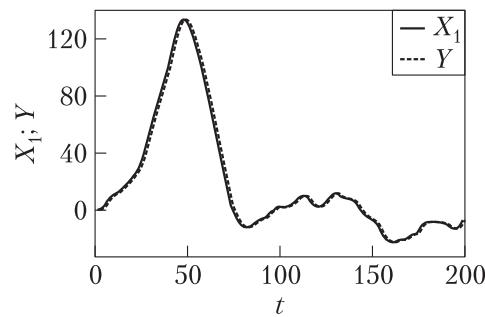


Рис. 11 Измеряемая величина X_1 и оценка Y

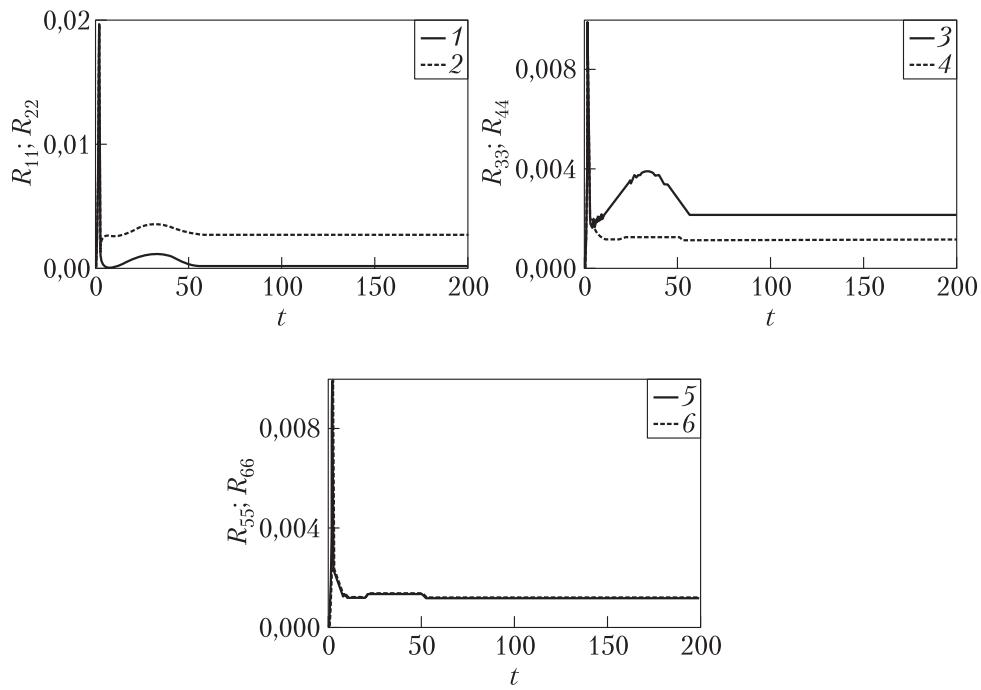


Рис. 12 Ошибки оценивания R_{11} (1), R_{22} (2), R_{33} (3), R_{44} (4), R_{55} (5) и R_{66} (6)

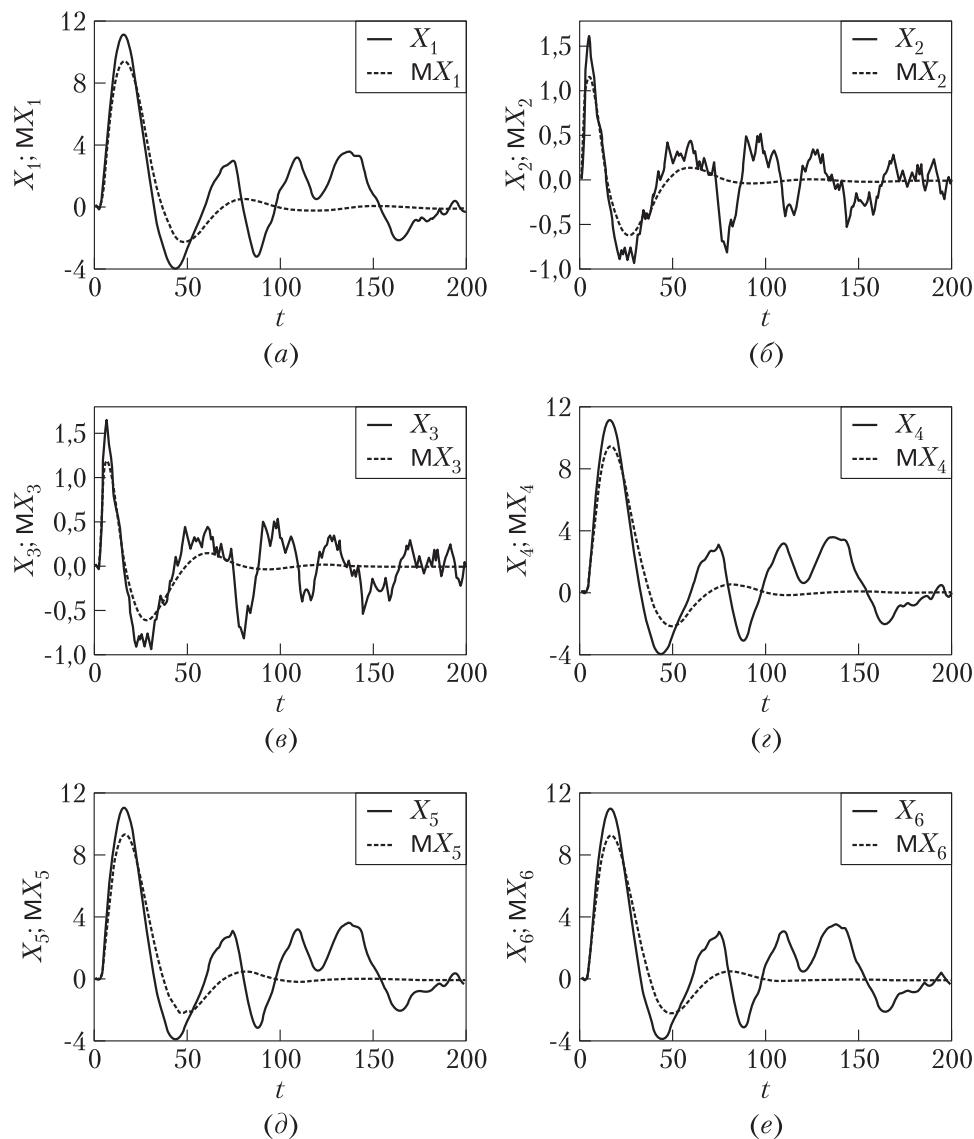


Рис. 13 Величина X_1 и математическое ожидание MX_1 (а); величина X_2 и математическое ожидание MX_2 (б); величина X_3 и математическое ожидание MX_3 (в); величина X_4 и математическое ожидание MX_4 (г); величина X_5 и математическое ожидание MX_5 (д); величина X_6 и математическое ожидание MX_6 (е)

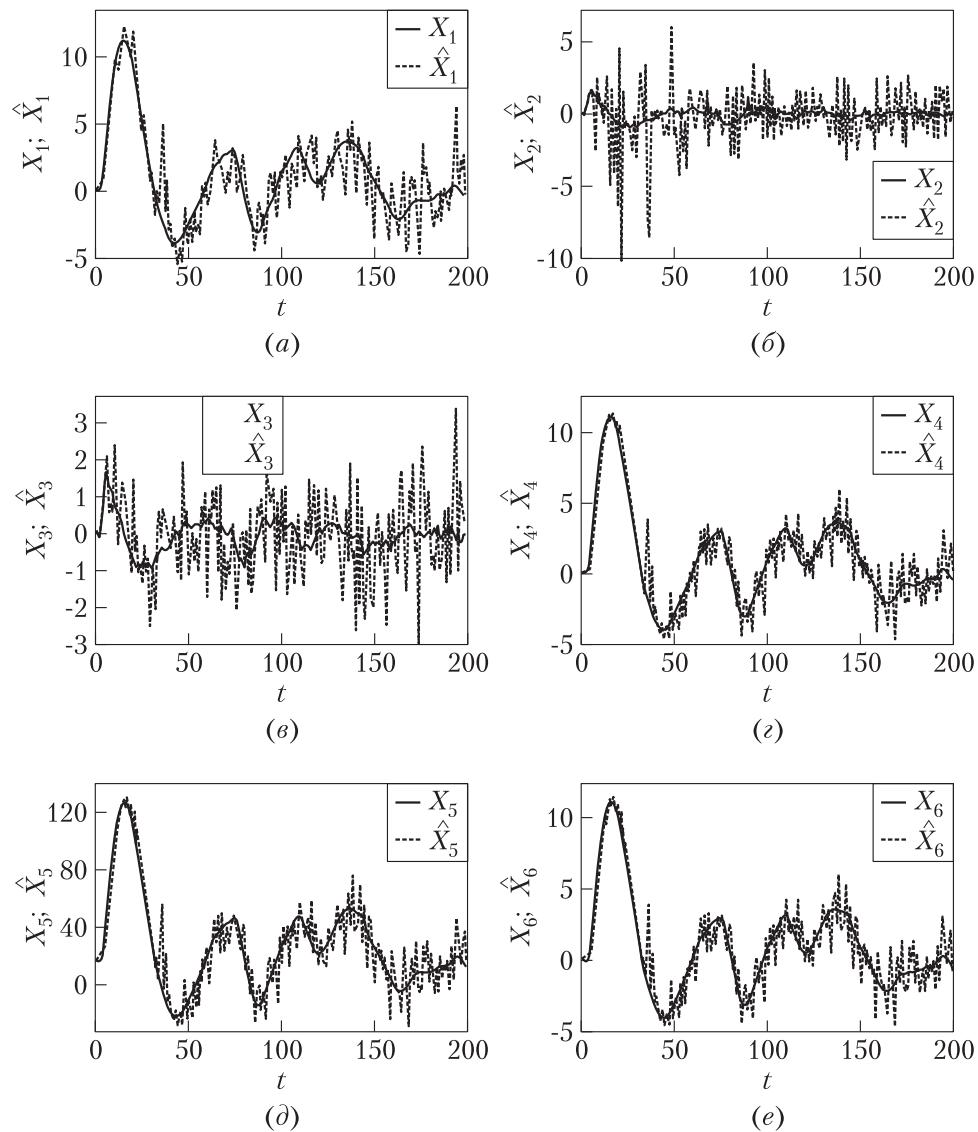


Рис. 14 Величина X_1 и оценка \hat{X}_1 (а); величина X_2 и оценка \hat{X}_2 (б); величина X_3 и оценка \hat{X}_3 (в); величина X_4 и оценка \hat{X}_4 (г); величина X_5 и оценка \hat{X}_5 (д); величина X_6 и оценка \hat{X}_6 (е)

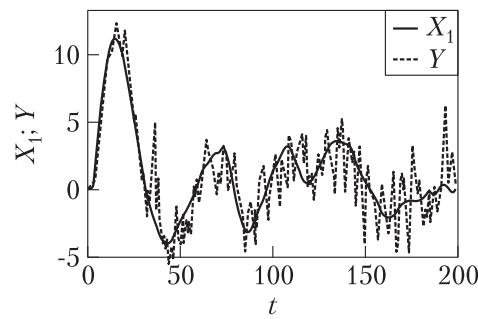


Рис. 15 Измеряемая величина X_1 и оценка Y

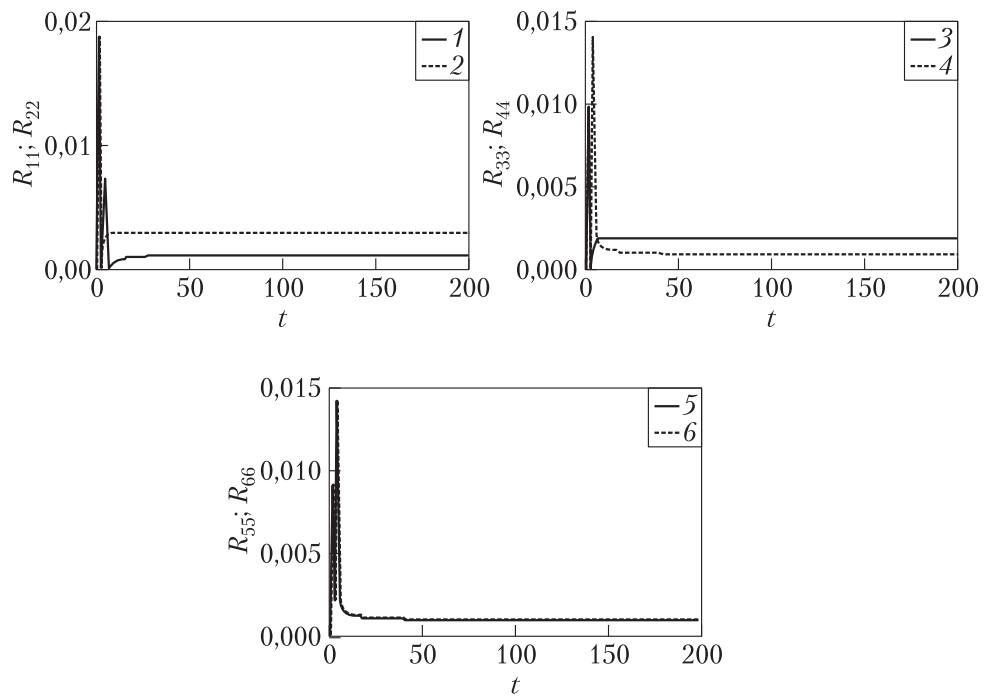


Рис. 16 Ошибки оценивания R_{11} (1), R_{22} (2), R_{33} (3), R_{44} (4), R_{55} (5) и R_{66} (6)

Литература

1. Колмановский В. Б., Носов В. Р. Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последействием. — М.: Наука, 1981. 386 с.
2. Синицын И. Н. Stochastic hereditary control systems // Проблемы управления и теории информатики, 1986. Т. 15. № 4. С. 287–298.
3. Синицын И. Н. Конечномерные распределения процессов в стохастических интегральных и интегродифференциальных системах // 2nd Symposium (International) IFAC on Stochastic Control. — Pergamon Press, 1987. Pt. 1. P. 144–153.
4. Синицын И. Н. Анализ и моделирование распределений в эредитарных стохастических системах // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 1. С. 2–11.
5. Синицын И. Н., Сергеев И. В., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В. Математическое обеспечение параметрического моделирования распределений в интегродифференциальных стохастических системах // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 1. С. 2–43.
6. Синицын И. Н., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В. Развитие математического обеспечения аналитического и статистического моделирования эредитарных стохастических систем // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'15): Тр. X Междунар. конф., 2015. CD-ROM. С. 1275–1297.
7. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с. [Pugachev V. S., Sinitsyn I. N. Stochastic differential systems. Analysis and filtering. — Chichester, New York: Jonh Wiley, 1987. 549 p.]
8. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с. [Pugachev V. S., Sinitsyn I. N. Stochastic systems. Theory and applications. — Singapore: Words Scientific, 2001. 908 p.].
9. Синицын И. Н., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Чумин И. В. Методическое и программное обеспечение анализа качества и моделирования сингулярных стохастических систем // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'05): Тр. IV Междунар. конф., 2005. CD-ROM. С. 1734–1743.
10. 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.
11. Синицын И. Н. Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. 768 с.
12. 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.
13. 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.
14. Синицын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачёва. — 2-е изд. — М.: Логос, 2007. 776 с.

15. Синицын И. Н., Корепанов Э. Р. Устойчивые линейные условно оптимальные фильтры и экстраполаторы для стохастических систем с мультиплекативными шумами // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 1. С. 70–75.
16. Синицын И. Н., Корепанов Э. Р. Синтез устойчивых линейных фильтров и экстраполаторов Пугачёва для стохастических систем с мультиплекативными широкополосными шумами // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 1. С. 108–126.
17. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике / Пер. с англ. — М.: Наука, 1984. 831 с. (Korn G. A., Korn T. M. Mathematical handbook. — New York: McGraw-Hill, 1968. 943 p.)
18. Kloeden P., Platen E. Numerical solution of stochastic differential equations. — Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 1992. 636 p.
19. Артемьев С. С. Численные методы решения задач Коши для систем обыкновенных и стохастических дифференциальных уравнений. — Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1993. 156 с.
20. Кузнецов Д. Ф. Численное интегрирование стохастических дифференциальных уравнений. — СПб.: СПбГУ, 2001. 712 с.
21. Синицын И. Н., Синицын В. И. Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации распределений в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.

Поступила в редакцию 19.02.15

SOFTWARE FOR SYNTHESIS OF DISCRETE PUGACHEV FILTERS FOR NORMAL PROCESSES IN HEREDITARY STOCHASTIC SYSTEMS

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

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

Abstract: Algorithms for synthesis of discrete conditionally optimal (Pugachev) filters (PF) for normal processing in continuous and discrete linear and nonlinear hereditary stochastic systems (HStS) with Wiener and Poisson noises are considered. Introduction is devoted to the survey of analysis and modeling problems in HStS. It is stated that for real time processing, problems in informatics and control PF are effective in computer realization. The theorems for HStS reduction to differential StS and discrete StS are presented. Also, the theorems for discrete PF synthesis for normal processing in linear and nonlinear HStS are given. The HStS test shock examples for software tools “IDStS-Filtering” are represented.

Keywords: differential stochastic system (DStS); linear Kalman filter (KF); linear Pugachev filter (PF); software tools “IDStS-Filtering;” method of normal approximation (MNA); statistical linearization method (SLM); normal stochastic process; shock (impulse) noise; hereditary (integrodifferential) stochastic system (HStS); MATLAB

DOI: 10.14357/08696527150202

References

1. Kolmanovskiy, V. B., and V. R. Nosov. 1981. *Ustoychivost' i periodicheskie rezhimy reguliruemых sistem s posledeystviem* [Stability of hereditary systems]. — Moscow: Nauka. 386 p.
2. Sinitsyn, I. N. 1986. Stochastic hereditary control systems. *Problemy Upravleniya i Teorii Informatiki* [Problems of Control and Information Theory] 15(4):287–298.
3. Sinitsyn, I. N. 1987. Konechnomernye raspredeleniya protsessov v stokhasticheskikh integral'nykh i integrodifferentsial'nykh sistemakh [Finite-dimensional distributions in stochastic integral and integrodifferential systems]. *2nd Symposium (International) IFAC on Stochastic Control*. Pergamon Press. 1:144–153.
4. Sinitsyn, I. N. 2014. Analiz i modelirovanie raspredeleniy v ereditarnykh stokhasticheskikh sistemakh [Analysis and modeling of distributions in hereditary stochastic systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform Appl.* 8(1):2–11.
5. Sinitsyn, I. N. I. V. Sergeev, V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and V. V. Belousov. 2014. Matematicheskoe obespechenie parametricheskogo modelirovaniya raspredeleniy v integrodifferentsial'nykh stokhasticheskikh sistemakh [Software for parametric modeling of distributions in integrodifferential stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(1):2–43.
6. Sinitsyn, I. N., E. R. Korepanov, and V. V. Belousov. 2015. Razvitie matematicheskogo obespecheniya analiticheskogo i statisticheskogo modelirovaniya ereditarnykh stokhasticheskikh sistem [Development of analytical and statistical modeling for hereditary stochastic systems]. *10th Conference (International) on System Identification and Control Problems (SICPRO'15) Proceedings*. CD-ROM. 1275–1297.
7. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester, New York: John Wiley. 549 p.
8. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
9. Sinitsyn, I. N., E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and I. V. Chumin. 2005. Metodicheskoe i programmnoe obespechenie analiza kachestva i modelirovaniya singulyarnykh stokhasticheskikh sistem [Methodology and software for singular stochastic systems quality analysis and modeling]. *10th Conference (International) on System Identification and Control Problems (SICPRO'05) Proceedings*. CD-ROM. 1734–1743.
10. Sinitsyn, I. N., E. R. Koperanov, V. V. Belousov, and A. V. Kutsenko. 2007. Razvitie metodicheskogo i programmnogo obespecheniya na osnove simvol'nykh vychisleniy dlya issledovaniya stokhasticheskikh sistem [Development of methodology and software for stochastic systems based symbolic computing]. *6th Conference (International) on System Identification and Control Problems (SICPRO'07) Proceedings*. CD-ROM. 1447–1462.

11. 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 their application to scientific computer aided support]. Moscow: TORUS PRESS. 768 p.
12. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Koperanov, 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 software for stochastic systems analysis and modeling based on canonical expansions]. *8th Conference (International) on System Identification and Control Problems (SICPRO'09) Proceedings*. CD-ROM. 1059–1072.
13. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Parametrical statistical and analytical modeling of distributions in stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):4–16.
14. Sinitsyn, I. N. 2007. *Fil'try Kalmana i Pugacheva* [Kalman and Pugachev filters]. Moscow: Logos. 2nd ed. 776 p.
15. Sinitsyn, I. N., and E. R. Korepanov. 2015. Ustoychivye lineynye uslovno optimal'nye fil'try i ekstrapolyatory dlya stokhasticheskikh sistem s mul'tiplikativnymi shumami [Stable linear conditionally optimal filters and extrapolators for stochastic systems with parametric noises]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(1):70–75.
16. Sinitsyn, I. N., and E. R. Korepanov. 2015. Sintez ustoychivykh lineynykh fil'trov i ekstrapolyatorov Pugacheva dlya stokhasticheskikh sistem s mul'tiplikativnymi shirokopolosnymi shumami [Synthesis of stable linear Pugachev filters and extrapolators for stochastic systems with wide band multiplicative noises]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(1):108–126.
17. Korn, G., and T. Korn. 1968. *Mathematical handbook*. New York: McGraw-Hill. 943 p.
18. Kloeden, P., and E. Platen. 1992. *Numerical solution of stochastic differential equations*. Berlin – Heidelberg – New York: Springer. 636 p.
19. Artem'ev, S. S. 1993. *Chislennye metody resheniya zadachi Koshi dlya sistem obyknovennykh i stokhasticheskikh differentials'nykh uravneniy* [Cauchi problem numerical methods for systems of ordinary and stochastic equations]. Novosibirsk: VTs SO RAN. 156 p.
20. Kuznetsov, D. F. 2001. *Chislennoe integriruvaniye stokhasticheskikh differentials'nykh uravneniy* [Numerical methods for stochastic differential equations]. St. Petersburg: SPbGU. 712 p.
21. 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 distributions approximations]. Moscow: TORUS PRESS. 488 p.

Received February 19, 2015

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,” Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sinitsin@dol.ru

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ С ДИСКРЕТНЫМ ВРЕМЕНЕМ, ВХОДЯЩИМ ПОТОКОМ АВТОРЕГРЕССИОННОГО ТИПА И ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ*

Н. Д. Леонтьев¹, В. Г. Ушаков²

Аннотация: Рассмотрены две одноканальные системы массового обслуживания с дискретным временем, бесконечным числом мест для ожидания и обратной связью. Входящий поток в рассматриваемых системах подчинен модели дискретной авторегрессии, т. е. размер каждой поступающей в систему группы требований с некоторой фиксированной вероятностью может оказаться равен размеру одной из ранее поступивших групп требований либо с дополнительной вероятностью является случайной величиной, не зависящей от истории. Основным объектом изучения является длина очереди в стационарном режиме. В случае регрессионной зависимости первого порядка получены формулы для распределения длины очереди, а в случае зависимости второго порядка найдено математическое ожидание длины очереди.

Ключевые слова: теория массового обслуживания; системы с дискретным временем; модель дискретной авторегрессии; системы с групповым поступлением требований; обратная связь

DOI: 10.14357/08696527150203

1 Введение

Настоящая статья посвящена исследованию систем массового обслуживания типа DAR(k)| D |1 с обратной связью. Системы с входящим потоком авторегрессионного типа изучаются в большом числе работ по теории массового обслуживания; в качестве примеров приведем статью [1], в которой рассмотрена система с непрерывным временем, и статьи [2] и [3], в которых рассмотрены системы с дискретным временем. Рассматриваемые в данной статье постановки задач обобщают [2, 3] на случай обратной связи: предполагается, что по прошествии времени обслуживания требование может с определенной вероятностью возвращаться обратно в очередь.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-07-02354).

¹Факультет вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова; ndleontyev@gmail.com

²Факультет вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова; Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; vgushakov@mail.ru

2 Модель дискретной авторегрессии

В моделировании входящего потока изучаемых систем обслуживания будут использоваться случайные последовательности специального вида, описанию которых посвящен настоящий раздел.

Пусть $\{B_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ — последовательность независимых и одинаково распределенных случайных величин, принимающих неотрицательные целочисленные значения. Обозначим $\beta(z)$ производящую функцию случайной величины B_n , т. е. $\beta(z) = \mathbf{E}[z^{B_n}]$, а также $b_1 = \mathbf{E}[B_n]$, $b_2 = \mathbf{E}[B_n^2]$. Величины A_n подчиняются модели дискретной авторегрессии порядка k ($DAR(k)$), если

$$A_n = (1 - \alpha_n) A_{n-\Phi_n} + \alpha_n B_n, \quad n \in \mathbb{Z},$$

где $\{\alpha_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ — последовательность независимых случайных величин, имеющих распределение Бернулли с параметром p , $0 < p \leq 1$; $\{\Phi_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ — последовательность независимых случайных величин с распределением

$$\mathbf{P}(\Phi_n = i) = \varphi_i, \quad i = 1, 2, \dots, k;$$

последовательности $\{\alpha_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$, $\{B_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ и $\{\Phi_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ независимы¹. Иначе говоря,

$$A_n = \begin{cases} B_n & \text{с вероятностью } p; \\ A_{n-1} & \text{с вероятностью } (1-p)\varphi_1; \\ A_{n-2} & \text{с вероятностью } (1-p)\varphi_2; \\ \vdots & \\ A_{n-k} & \text{с вероятностью } (1-p)\varphi_k. \end{cases}$$

3 Система DAR (1) |D|1 с обратной связью

Рассмотрим систему массового обслуживания, в которой в течение интервала $(n-1, n)$ обслуживается одно требование и поступает A_n требований. Будем считать, что A_n подчиняется модели дискретной авторегрессии первого порядка. Также предположим, что каждое обслуживание может с вероятностью $q > 0$ оказаться «неудачным», вследствие чего обслуженное требование возвращается обратно в очередь.

Обозначим L_n число требований в системе в момент n . Эволюция L_n задается уравнением

$$L_{n+1} = \max(L_n - f_{n+1}, 0) + A_{n+1},$$

где $\{f_n\}_{n \geq 1}$ — последовательность независимых бернульевских случайных величин с параметром $1 - q$.

¹ Подробнее о модели дискретной авторегрессии см. [4]

Можно показать, что последовательность $\{(L_n, A_n)\}_{n \geq 1}$ является цепью Маркова.

Для $|z| < 1, |w| < 1$ обозначим $\varphi_n(z, w)$ совместную производящую функцию вектора (L_n, A_n) :

$$\varphi_n(z, w) = \mathbf{E} [z^{L_n} w^{A_n}] .$$

Будем считать, что $b_1 < 1 - q$. При этом условии можно осуществить предельный переход

$$\varphi(z, w) = \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi_n(z, w) .$$

Формула для определения $\varphi(z, w)$ и ее вывод содержатся в следующей теореме.

Теорема 1. В предположении $b_1 < 1 - q$ для z таких, что $|z| < 1$ и $(1-p)|q + (1-q)/z| < 1$, и w таких, что $|w| < 1$, справедливо

$$\begin{aligned} \varphi(z, w) = (1 - q - b_1) \left(1 - \frac{1}{z}\right) &\left[(1 - p) h_1(z) + \right. \\ &+ p \left(1 + \left(q + \frac{1 - q}{z}\right) \frac{(1 - p)h_1(z) + ph_2(z, 1)}{1 - p(q + (1 - q)/z)h_2(z, 1)}\right) h_2(z, w) \left. \right], \end{aligned}$$

здесь

$$\begin{aligned} h_1(z) &= \sum_{n=0}^{\infty} (1 - p)^n \left(q + \frac{1 - q}{z}\right)^n ; \\ h_2(z, w) &= \sum_{n=0}^{\infty} (1 - p)^n \left(q + \frac{1 - q}{z}\right)^n \beta(z^{n+1} w) . \end{aligned}$$

Доказательство. Выпишем $\varphi_{n+1}(z, w)$:

$$\begin{aligned} \varphi_{n+1}(z, w) &= \mathbf{E} [z^{L_{n+1}} w^{A_{n+1}}] = \\ &= \mathbf{E} [z^{\max(L_n - f_{n+1}, 0)} (zw)^{(1 - \alpha_{n+1})A_n + \alpha_{n+1}B_{n+1}}] = \\ &= p \mathbf{E} [z^{\max(L_n - f_{n+1}, 0)} (zw)^{B_{n+1}}] + (1 - p) \mathbf{E} [z^{\max(L_n - f_{n+1}, 0)} (zw)^{A_n}] . \end{aligned}$$

Преобразуем первое слагаемое:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} [z^{\max(L_n - f_{n+1}, 0)} (zw)^{B_{n+1}}] &= \mathbf{E} [z^{\max(L_n - f_{n+1}, 0)}] \mathbf{E} [(zw)^{B_{n+1}}] = \\ &= \left\{ q \mathbf{E} [z^{L_n}] + (1 - q) \mathbf{E} [z^{\max(L_n - 1, 0)}] \right\} \mathbf{E} [(zw)^{B_{n+1}}] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left\{ q\mathbf{E}[z^{L_n}] + (1-q)\mathbf{E}\left[z^{\max(L_n-1,0)}(\mathbf{1}_{\{L_n=0\}} + \mathbf{1}_{\{L_n>0\}})\right] \right\} \mathbf{E}[(zw)^{B_{n+1}}] = \\
 &= \left\{ q\mathbf{E}[z^{L_n}] + (1-q)(\mathbf{E}[\mathbf{1}_{\{L_n=0\}}] + \mathbf{E}[z^{L_n-1}\mathbf{1}_{\{L_n>0\}}]) \right\} \mathbf{E}[(zw)^{B_{n+1}}] = \\
 &\quad = \left\{ q\mathbf{E}[z^{L_n}] + (1-q) \left(\mathbf{E}[\mathbf{1}_{\{L_n=0\}}] + \right. \right. \\
 &\quad \quad \left. \left. + \frac{1}{z} (\mathbf{E}[z^{L_n}] - \mathbf{E}[\mathbf{1}_{\{L_n=0\}}]) \right) \right\} \mathbf{E}[(zw)^{B_{n+1}}] = \\
 &= \left\{ \left(q + \frac{1-q}{z} \right) \mathbf{E}[z^{L_n}] + (1-q) \left(1 - \frac{1}{z} \right) \mathbf{E}[\mathbf{1}_{\{L_n=0\}}] \right\} \mathbf{E}[(zw)^{B_{n+1}}] = \\
 &= \left\{ \left(q + \frac{1-q}{z} \right) \varphi_n(z, 1) + (1-q) \left(1 - \frac{1}{z} \right) \mathbf{P}(L_n = 0) \right\} \beta(zw).
 \end{aligned}$$

Второе слагаемое¹:

$$\begin{aligned}
 &\mathbf{E}\left[z^{\max(L_n-f_{n+1},0)}(zw)^{A_n}\right] = \\
 &= q\mathbf{E}[z^{L_n}(zw)^{A_n}] + (1-q)\mathbf{E}\left[z^{\max(L_n-1,0)}(zw)^{A_n}\right] = \\
 &= q\mathbf{E}[z^{L_n}(zw)^{A_n}] + (1-q)\mathbf{E}\left[z^{\max(L_n-1,0)}(zw)^{A_n}(\mathbf{1}_{\{L_n=0\}} + \mathbf{1}_{\{L_n>0\}})\right] = \\
 &= q\mathbf{E}[z^{L_n}(zw)^{A_n}] + (1-q)(\mathbf{E}[\mathbf{1}_{\{L_n=0\}}] + \mathbf{E}[z^{L_n-1}(zw)^{A_n}\mathbf{1}_{\{L_n>0\}}]) = \\
 &\quad = q\mathbf{E}[z^{L_n}(zw)^{A_n}] + (1-q) \left(\mathbf{E}[\mathbf{1}_{\{L_n=0\}}] + \right. \\
 &\quad \quad \left. + \frac{1}{z} (\mathbf{E}[z^{L_n}(zw)^{A_n}] - \mathbf{E}[\mathbf{1}_{\{L_n=0\}}]) \right) = \\
 &= \left(q + \frac{1-q}{z} \right) \mathbf{E}[z^{L_n}(zw)^{A_n}] + (1-q) \left(1 - \frac{1}{z} \right) \mathbf{E}[\mathbf{1}_{\{L_n=0\}}] = \\
 &= \left(q + \frac{1-q}{z} \right) \varphi_n(z, zw) + (1-q) \left(1 - \frac{1}{z} \right) \mathbf{P}(L_n = 0).
 \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned}
 &\varphi_{n+1}(z, w) = \\
 &= p \left\{ \left(q + \frac{1-q}{z} \right) \varphi_n(z, 1) + (1-q) \left(1 - \frac{1}{z} \right) \mathbf{P}(L_n = 0) \right\} \beta(zw) + \\
 &\quad + (1-p) \left\{ \left(q + \frac{1-q}{z} \right) \varphi_n(z, zw) + (1-q) \left(1 - \frac{1}{z} \right) \mathbf{P}(L_n = 0) \right\} =
 \end{aligned}$$

¹Здесь использован тот факт, что $L_n = 0$ влечет $A_n = 0$.

$$\begin{aligned}
 &= (1-p)(1-q) \left(1 - \frac{1}{z}\right) \mathbf{P}(L_n = 0) + p \left((1-q) \left(1 - \frac{1}{z}\right) \mathbf{P}(L_n = 0) + \right. \\
 &\quad \left. + \left(q + \frac{1-q}{z}\right) \varphi_n(z, 1) \right) \beta(zw) + (1-p) \left(q + \frac{1-q}{z}\right) \varphi_n(z, zw).
 \end{aligned}$$

При условии $b_1 < 1 - q$ можно осуществить предельный переход

$$\begin{aligned}
 \varphi(z, w) &= (1-p)(1-q) \left(1 - \frac{1}{z}\right) l_0 + +p \left((1-q) \left(1 - \frac{1}{z}\right) l_0 + \right. \\
 &\quad \left. + \left(q + \frac{1-q}{z}\right) \varphi(z, 1) \right) \beta(zw) + (1-p) \left(q + \frac{1-q}{z}\right) \varphi(z, zw),
 \end{aligned}$$

где $l_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}(L_n = 0)$. Для z таких, что $(1-p)|q + (1-q)/z| < 1$, уравнение можно переписать в виде:

$$\begin{aligned}
 \varphi(z, w) &= (1-p)(1-q) \left(1 - \frac{1}{z}\right) l_0 h_1(z) + \\
 &\quad + p \left((1-q) \left(1 - \frac{1}{z}\right) l_0 + \left(q + \frac{1-q}{z}\right) \varphi(z, 1) \right) h_2(z, w), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 h_1(z) &= \sum_{n=0}^{\infty} (1-p)^n \left(q + \frac{1-q}{z}\right)^n; \\
 h_2(z, w) &= \sum_{n=0}^{\infty} (1-p)^n \left(q + \frac{1-q}{z}\right)^n \beta(z^{n+1}w).
 \end{aligned}$$

Подставив в (1) $w = 1$, получим

$$\varphi(z, 1) = \frac{(1-p)(1-q)(1-1/z)l_0h_1(z) + p(1-q)(1-1/z)l_0h_2(z, 1)}{1-p(q+(1-q)/z)h_2(z, 1)}.$$

Перепишем полученное выражение:

$$\begin{aligned}
 \varphi(z, 1)(z - p(qz + 1 - q)h_2(z, 1)) &= (1-p)(1-q)(z-1)l_0h_1(z) + \\
 &\quad + p(1-q)(z-1)l_0h_2(z, 1). \quad (2)
 \end{aligned}$$

Дифференцируя (2) по z и подставляя в полученное выражение $z = 1$, получим $l_0 = 1 - (1/(1-q))b_1$. Следовательно,

$$\varphi(z, 1) = (1-q-b_1) \left(1 - \frac{1}{z}\right) \frac{(1-p)h_1(z) + ph_2(z, 1)}{1-p(q+(1-q)/z)h_2(z, 1)}. \quad (3)$$

Наконец, подставив (3) в (1), после некоторых преобразований получим

$$\begin{aligned}\varphi(z, w) = & (1 - q - b_1) \left(1 - \frac{1}{z}\right) \left[(1 - p)h_1(z) + \right. \\ & \left. + p \left(1 + \left(q + \frac{1 - q}{z}\right) \frac{(1 - p)h_1(z) + ph_2(z, 1)}{1 - p(q + (1 - q)/z)h_2(z, 1)}\right) h_2(z, w) \right].\end{aligned}$$

Теорема доказана.

Следствие 1.1. Получено выражение для производящей функции длины очереди в стационарном режиме:

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[z^{L_n}] = & \\ = & \varphi(z, 1) = (1 - q - b_1) \left(1 - \frac{1}{z}\right) \frac{(1 - p)h_1(z) + ph_2(z, 1)}{1 - p(q + (1 - q)/z)h_2(z, 1)}. \quad (4)\end{aligned}$$

Подставляя в (4) $q = 0$, получим аналогичный результат для системы без обратной связи:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[z^{L_n}] = (1 - b_1) \left(1 - \frac{1}{z}\right) \frac{(1 - p)h_1(z) + ph_2(z, 1)}{1 - (p/z)h_2(z, 1)}. \quad (5)$$

Следствие 1.2. Дифференцируя (2), можно получить выражение для математического ожидания длины очереди в стационарном режиме:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[L_n] = \frac{1}{1 - q - b_1} \left[\frac{b_2 - 2b_1^2 + b_1}{2} + \frac{(1 - p)b_2}{p} - \frac{(1 - p)(1 - q)b_1}{p} \right]. \quad (6)$$

Аналогичный результат для системы без обратной связи примет вид

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[L_n] = \frac{1}{1 - b_1} \left[\frac{b_2 - 2b_1^2 + b_1}{2} + \frac{(1 - p)b_2}{p} - \frac{(1 - p)b_1}{p} \right]. \quad (7)$$

Отметим, что (5) и (7) соответствуют результатам статьи [2].

4 Система DAR (2) |D|1 с обратной связью

Рассмотрим теперь систему массового обслуживания типа DAR (2) |D|1, т. е. систему, в которой входящий поток групп требований, задаваемый последовательностью A_n , подчиняется модели дискретной авторегрессии второго порядка. В остальном рассматриваемая система аналогична изученной выше.

Ставится задача нахождения математического ожидания длины очереди в стационарном режиме¹.

Обозначим L_n число требований в системе в момент n . Эволюция L_n задается уравнением:

$$L_{n+1} = \max(L_n - f_{n+1}, 0) + A_{n+1} = L_n - U_{n+1} + A_{n+1}, \quad (8)$$

где $\{f_n\}_{n \geq 1}$ — последовательность независимых бернуlliевских случайных величин с параметром $1 - q$, $U_{n+1} = \mathbf{1}_{\{L_n > 0\}} \mathbf{1}_{\{f_{n+1} > 0\}}$.

Будем считать, что $b_1 < 1 - q$. Сделаем дополнительное предположение $\mathbf{P}(A_n = 1) = 0$, которое позволит получить необходимые результаты в явном виде. Докажем сначала следующее вспомогательное утверждение.

Лемма. *В предположении $\mathbf{P}(A_n = 1) = 0$ имеем $\mathbf{E}[A_{n-1}U_{n+1}] = (1-q)\mathbf{E}[A_{n-1}]$.*

Доказательство. Имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[A_{n-1}U_{n+1}] &= \mathbf{E}[A_{n-1}U_{n+1}\mathbf{1}_{\{A_{n-1}>0\}}] = \mathbf{E}[A_{n-1}U_{n+1}\mathbf{1}_{\{A_{n-1}\geq 2\}}] = \\ &= \mathbf{E}[A_{n-1}\mathbf{1}_{\{L_n>0\}}\mathbf{1}_{\{f_{n+1}>0\}}\mathbf{1}_{\{A_{n-1}\geq 2\}}] = \mathbf{E}[A_{n-1}\mathbf{1}_{\{f_{n+1}>0\}}\mathbf{1}_{\{A_{n-1}\geq 2\}}] = \\ &= (1-q)\mathbf{E}[A_{n-1}\mathbf{1}_{\{A_{n-1}\geq 2\}}] = (1-q)\mathbf{E}[A_{n-1}\mathbf{1}_{\{A_{n-1}>0\}}] = (1-q)\mathbf{E}[A_{n-1}]. \end{aligned}$$

Здесь использован тот факт, что $\{A_{n-1} \geq 2\}$ в силу (8) влечет $\{L_n > 0\}$.

Лемма доказана.

Теорема 2. *Предполагая, что $b_1 < 1 - q$ и $\mathbf{P}(A_n = 1) = 0$, имеем*

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[L_n] &= \frac{1}{1 - q - b_1} \left[\frac{b_2 - 2b_1^2 + b_1}{2} + \frac{(1-p)(1-(1-p)^2\varphi_2^2)b_2}{p(1-(1-p)\varphi_2)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(1-p)\varphi_2 b_1^2}{1-(1-p)\varphi_2} - \frac{(1-p)(1-q)(1+\varphi_2)b_1}{p} \right]. \end{aligned}$$

Доказательство. Возведем в квадрат уравнение (8) и возьмем математическое ожидание от обеих его частей:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[L_{n+1}^2] &= \mathbf{E}[L_n^2] + \mathbf{E}[U_{n+1}^2] + \mathbf{E}[A_{n+1}^2] - 2\mathbf{E}[L_nU_{n+1}] + \\ &\quad + 2\mathbf{E}[(L_n - U_{n+1})A_{n+1}]. \quad (9) \end{aligned}$$

Легко видеть, что $\mathbf{E}[U_{n+1}^2] = \mathbf{E}[U_{n+1}]$, $\mathbf{E}[A_{n+1}^2] = \mathbf{E}[B_{n+1}^2] = b_2$ и $\mathbf{E}[L_nU_{n+1}] = \mathbf{E}[L_n\mathbf{1}_{\{L_n>0\}}\mathbf{1}_{\{f_{n+1}>0\}}] = (1-q)\mathbf{E}[L_n]$. Переайдем к нахождению $\mathbf{E}[(L_n - U_{n+1})A_{n+1}]$. Имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[(L_n - U_{n+1})A_{n+1}] &= \mathbf{E}[(L_{n-1} - U_{n-1} + A_n - U_{n+1})A_{n+1}] = \\ &= \mathbf{E}[(L_{n-1} - U_{n-1})A_{n+1}] + \mathbf{E}[A_nA_{n+1}] - \mathbf{E}[U_{n+1}A_{n+1}]. \quad (10) \end{aligned}$$

¹Методы нахождения распределения длины очереди в стационарном режиме, использованные в предыдущем разделе, в данном случае не дают результата.

Первое слагаемое¹:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}[(L_{n-1} - U_{n-1}) A_{n+1}] &= (1-p)\varphi_1 \mathbf{E}[(L_{n-1} - U_{n-1}) A_n] + \\
 &\quad + (1-p)\varphi_2 \mathbf{E}[(L_{n-1} - U_{n-1}) A_{n-1}] + p \mathbf{E}[(L_{n-1} - U_{n-1}) B_{n+1}] = \\
 &\quad = (1-p)\varphi_1 \mathbf{E}[(L_{n-1} - U_{n-1}) A_n] + \\
 &\quad + (1-p)\varphi_2 \mathbf{E}[(L_{n-2} - U_{n-2} + A_{n-1} - U_{n-1}) A_{n-1}] + \\
 &\quad + p \mathbf{E}[L_{n-1} - U_{n-1}] \mathbf{E}[B_{n+1}] = (1-p)\varphi_1 \mathbf{E}[(L_{n-1} - U_{n-1}) A_n] + \\
 &\quad + (1-p)\varphi_2 \mathbf{E}[(L_{n-2} - U_{n-2}) A_{n-1}] + (1-p)\varphi_2 \mathbf{E}[(A_{n-1} - U_{n-1}) A_{n-1}] + \\
 &\quad + pb_1 (\mathbf{E}[L_{n-1}] - \mathbf{E}[U_{n-1}]) = (1-p)\varphi_1 \mathbf{E}[(L_{n-1} - U_{n-1}) A_n] + \\
 &\quad + (1-p)\varphi_2 \mathbf{E}[(L_{n-2} - U_{n-2}) A_{n-1}] + \\
 &\quad + (1-p)\varphi_2 (b_2 - (1-q)b_1) + pb_1 (\mathbf{E}[L_{n-1}] - \mathbf{E}[U_{n-1}]).
 \end{aligned}$$

Второе слагаемое:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}[A_n A_{n+1}] &= (1-p)\varphi_1 \mathbf{E}[A_n^2] + (1-p)\varphi_2 \mathbf{E}[A_n A_{n-1}] + p \mathbf{E}[A_n B_{n+1}] = \\
 &= (1-p)\varphi_1 \mathbf{E}[B_n^2] + (1-p)\varphi_2 \mathbf{E}[A_n A_{n-1}] + p \mathbf{E}[A_n] \mathbf{E}[B_{n+1}] = \\
 &= (1-p)\varphi_1 b_2 + (1-p)\varphi_2 \mathbf{E}[A_n A_{n-1}] + pb_1^2.
 \end{aligned}$$

Переходя к пределу при $n \rightarrow \infty$, получаем:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[A_n A_{n+1}] = \frac{(1-p)\varphi_1 b_2 + pb_1^2}{1 - (1-p)\varphi_2}.$$

Вычитаемое:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}[U_{n+1} A_{n+1}] &= \\
 &= (1-p)\varphi_1 \mathbf{E}[U_{n+1} A_n] + (1-p)\varphi_2 \mathbf{E}[U_{n+1} A_{n-1}] + p \mathbf{E}[U_{n+1} B_{n+1}] = \\
 &= (1-p)\varphi_1 \mathbf{E}[\mathbf{1}_{\{L_n > 0\}} \mathbf{1}_{\{f_{n+1} > 0\}} A_n \mathbf{1}_{\{A_n > 0\}}] + \\
 &\quad + (1-p)(1-q)\varphi_2 \mathbf{E}[A_{n-1}] + p \mathbf{E}[U_{n+1}] \mathbf{E}[B_{n+1}] = \\
 &= (1-p)(1-q)\varphi_1 \mathbf{E}[A_n \mathbf{1}_{\{A_n > 0\}}] + (1-p)(1-q)\varphi_2 \mathbf{E}[A_{n-1}] + \\
 &\quad + p \mathbf{E}[U_{n+1}] \mathbf{E}[B_{n+1}] = (1-p)(1-q)\varphi_1 b_1 + (1-p)(1-q)\varphi_2 b_1 + pb_1 \mathbf{E}[U_{n+1}] = \\
 &= (1-p)(1-q)b_1 + pb_1 \mathbf{E}[U_{n+1}].
 \end{aligned}$$

Здесь использован результат доказанной леммы.

Вернемся к уравнению (10). Подставив полученные выше выражения и перейдя к пределу при $n \rightarrow \infty$, будем иметь:

¹Вычисление $\mathbf{E}[U_{n-1} A_{n-1}]$ полностью повторяет аналогичные действия при преобразовании вычитаемого.

$$\begin{aligned}
 & \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E} [(L_n - U_{n+1}) A_{n+1}] = \\
 &= \frac{1}{p} \left((1-p)\varphi_2 (b_2 - (1-q)b_1) + pb_1 \lim_{n \rightarrow \infty} (\mathbf{E}[L_{n-1}] - \mathbf{E}[U_{n-1}]) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(1-p)\varphi_1 b_2 + pb_1^2}{1 - (1-p)\varphi_2} - (1-p)(1-q)b_1 - pb_1 \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[U_{n+1}] \right) = \\
 &= b_1 \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[L_n] - b_1 \right) + \\
 &+ \frac{(1-p)(1-(1-p)^2\varphi_2^2)b_2}{p(1-(1-p)\varphi_2)} + \frac{(1-p)\varphi_2 b_1^2}{1-(1-p)\varphi_2} - \frac{(1-p)(1-q)(1+\varphi_2)b_1}{p}.
 \end{aligned}$$

Здесь использован тот факт, что

$$\begin{aligned}
 \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[U_n] &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E} [\mathbf{1}_{\{L_{n-1}>0\}} \mathbf{1}_{\{f_n>0\}}] = \\
 &= (1-q) \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}(L_n > 0) = (1-q) \frac{b_1}{1-q} = b_1.
 \end{aligned}$$

Перейдем, наконец, в (9) к пределу при $n \rightarrow \infty$ и подставим полученные выше выражения для слагаемых:

$$\begin{aligned}
 0 &= b_1 + b_2 - 2(1-q) \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[L_n] + 2 \left(b_1 \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[L_n] - b_1 \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(1-p)(1-(1-p)^2\varphi_2^2)b_2}{p(1-(1-p)\varphi_2)} + \frac{(1-p)\varphi_2 b_1^2}{1-(1-p)\varphi_2} - \frac{(1-p)(1-q)(1+\varphi_2)b_1}{p} \right).
 \end{aligned}$$

Таким образом, выражение для математического ожидания длины очереди в стационарном режиме примет вид:

$$\begin{aligned}
 \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[L_n] &= \frac{1}{1-q-b_1} \left[\frac{b_2 - 2b_1^2 + b_1}{2} + \frac{(1-p)(1-(1-p)^2\varphi_2^2)b_2}{p(1-(1-p)\varphi_2)} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(1-p)\varphi_2 b_1^2}{1-(1-p)\varphi_2} - \frac{(1-p)(1-q)(1+\varphi_2)b_1}{p} \right]. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Следствие 2.1. Подставляя в (11) $q = 0$, получим аналогичный результат для системы без обратной связи:

$$\begin{aligned}
 \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[L_n] &= \frac{1}{1-b_1} \left[\frac{b_2 - 2b_1^2 + b_1}{2} + \frac{(1-p)(1-(1-p)^2\varphi_2^2)b_2}{p(1-(1-p)\varphi_2)} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(1-p)\varphi_2 b_1^2}{1-(1-p)\varphi_2} - \frac{(1-p)(1+\varphi_2)b_1}{p} \right].
 \end{aligned}$$

Полученное выражение соответствует результату статьи [3].

Следствие 2.2. Подставляя в (11) $\varphi_2 = 0$, получим выражение для математического ожидания длины очереди в стационарном режиме для системы DAR (1) $|D|1$ с обратной связью:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}[L_n] = \frac{1}{1 - q - b_1} \left[\frac{b_2 - 2b_1^2 + b_1}{2} + \frac{(1-p)b_2}{p} - \frac{(1-p)(1-q)b_1}{p} \right]. \quad (12)$$

Легко видеть, что формулы (6) и (12), полученные различными способами, совпадают.

Литература

1. Леонтьев Н. Д., Ушаков В. Г. Анализ системы обслуживания с входящим потоком авторегрессионного типа // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 3. С. 39–44.
2. Hwang G. U., Sohraby K. On the exact analysis of a discrete-time queueing system with autoregressive inputs // Queueing Syst., 2003. Vol. 43. No. 1-2. P. 29–41.
3. Miao D. W. C., Lee H. C. Second-order performance analysis of discrete-time queues fed by DAR (2) sources with a focus on the marginal effect of the additional traffic parameter // Appl. Stoch. Models Business Industry, 2013. Vol. 29. No. 1. P. 45–60.
4. Jacobs P. A., Lewis P. A. W. Discrete time series generated by mixtures. III: Autoregressive processes (DAR(p)). — Monterey, CA, USA: Naval Postgraduate School, 1978. 29 p.

Поступила в редакцию 17.02.15

A STUDY OF QUEUEING SYSTEMS WITH DISCRETE TIME, AUTOREGRESSIVE ARRIVALS, AND FEEDBACK

N. D. Leontyev¹ and V. G. Ushakov^{1,2}

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

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

Abstract: The paper studies two discrete-time single server queueing systems with infinite capacity and feedback. The arrivals in both systems are driven by discrete autoregressive models, i. e., the size of each arriving batch may be equal to the size of one of the previously arrived batches with some fixed probability, or is a random variable independent of the history with complementary probability. The main object of the study is the stationary queue length. For the system

with discrete autoregressive arrivals of order 1, expressions for queue length distribution are derived, and for the system with discrete autoregressive arrivals of order 2, the expected queue length is found.

Keywords: queueing theory; discrete-time queueing systems; discrete autoregressive model; batch arrivals; feedback

DOI: 10.14357/08696527150203

Acknowledgments

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-07-02354).

References

1. Leontyev, N. D., and V. G. Ushakov. 2014. Analiz sistemy obsluzhivaniya s vkhodyashchim potokom avtoregressionnogo tipa [Analysis of queueing system with autoregressive arrivals]. *Informatika i ee Primenenie — Inform. Appl.* 8(3):39–44.
2. Hwang, G. U., and K. Sohraby. 2003. On the exact analysis of a discrete-time queueing system with autoregressive inputs. *Queueing Syst.* 43(1-2):29–41.
3. Miao, D. W. C., and H. C. Lee. 2013. Second-order performance analysis of discrete-time queues fed by DAR (2) sources with a focus on the marginal effect of the additional traffic parameter. *Appl. Stoch. Models Business Industry* 29(1):45–60.
4. Jacobs, P. A., and P. A. W. Lewis. 1978. *Discrete time series generated by mixtures. III: Autoregressive processes (DAR(p))*. Monterey, CA: Naval Postgraduate School. 29 p.

Received February 17, 2015

Contributors

Leontyev Nikolai D. (b. 1988) — PhD student, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation; ndleontyev@gmail.com

Ushakov Vladimir G. (b. 1952) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation; senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; vgushakov@mail.ru

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ТРАНСПОРТНОМ УРОВНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКОЙ*

E. O. Карпухин¹, B. B. Карнаков¹, C. B. Филиппов¹

Аннотация: Рассмотрены основные подходы к оценке эффективности функционирования протоколов транспортного уровня современных информационно-телекоммуникационных систем, в которых реализован механизм управления перегрузкой. Проведен анализ существующих средств моделирования протоколов транспортного уровня, на основании которого делается вывод о невозможности в полной мере учесть особенности имитации процесса передачи данных. Приведены основные этапы разработки специализированной программной модели в среде .NET Framework. Доказана адекватность реализованной модели на основе сопоставления получившихся результатов моделирования с существующими оценками скорости передачи данных на транспортном уровне при использовании протокола TCP (Transmission Control Protocol).

Ключевые слова: транспортный уровень; управление перегрузкой; TCP; оптимизация протоколов информационного взаимодействия; специализированная программная модель; hijacking

DOI: 10.14357/08696527150204

1 Введение

Разработка и модернизация современных информационно-телекоммуникационных систем и сетей является трудоемкой задачей. Сложность построения таких систем связана с использованием в них разнообразных протоколов. Среди множества протоколов каждого уровня модели OSI (Open Systems Interconnection) одну из важнейших функций — доставку и сборку пакетов — выполняют протоколы транспортного уровня, обеспечивая информационное взаимодействие между различными службами и приложениями. От эффективности выполнения данных процедур зависит надежность и безопасность процесса обмена данными. Основным параметром, который позволяет оценить эффективность работы транспортных протоколов с надежной доставкой, является размер скользящего окна. Величина окна определяет скорость передачи данных между абонентами

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-07-31247 мол_а).

¹ Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук,
info@ditc.ras.ru

телекоммуникационной сети. Она выбирается как наименьшее значение между окном перегрузок (CWND — congestion window) и окном получателя (RWIN — receive window). В свою очередь, данные параметры зависят от множества факторов (времени на передачу пакета до получателя и назад (RTT — round trip time), размера буфера приемной стороны, таймеров на повторную передачу, размера пакета (MTU — maximum transmission unit), вероятности потери пакета в сети и др.), которые в полной мере нельзя учесть при построении аналитической модели процесса передачи данных для оценки величин CWND и RWIN. В этом случае определить величины CWND и RWIN позволяет натурное или имитационное моделирование.

В первом варианте моделирования предполагается реализация тестовой сети, в которой проводится эксперимент с измерением скорости передачи данных. Однако оценить параметры CWND и RWIN невозможно, так как данные величины недоступны для просмотра со стороны штатных средств операционной системы. Извлечение динамического изменения этих величин требует существенного вмешательства в стек протоколов, что не всегда можно сделать в силу закрытости исходного кода операционной системы (ОС). Получившаяся оценка также не позволит определить эффективность предлагаемого метода в части обеспечения защищенности процесса информационного взаимодействия между абонентами из-за невозможности отследить динамику изменения размера окна получателя.

Стоит также отметить трудность верификации и внедрения предлагаемых алгоритмов управления скользящим окном в компьютерных системах. Процесс отладки и тестирования требует изменения таких параметров, как RTT, вероятность потери пакета, длина и дисциплина обслуживания очередей. И хотя для этих целей существует модуль netem, входящий в состав ряда Linux-дистрибутивов [1], комбинирование ряда параметров (например, RTT и вероятности потери пакета) требует больших временных затрат. Поэтому для исследования эффективности функционирования протоколов транспортного уровня используют имитационные средства моделирования.

Существуют специальные языки имитационного моделирования, которые облегчают разработку программной модели по сравнению с использованием универсальных языков программирования. Примерами таких языков могут служить SIMULA, GPSS, SIMDIS. Однако данные языки не обладают функционалом для моделирования процессов обработки данных на уровне алгоритмов, в том числе алгоритмов управления перегрузкой.

Далее подробно рассмотрим существующие средства имитационного моделирования, в которых реализованы модели протоколов информационного взаимодействия, в том числе TCP.

2 Средства моделирования протоколов транспортного уровня

Существующие средства моделирования сетей можно разделить на две основные группы — средства для оптимизации функционирования компьютерных

сетей и средства для исследования основных протокольных элементов и компонентов (в основном это бесплатные средства). Первые включают наиболее распространенные типы маршрутизаторов, каналов связи, методов доступа, протоколов и т. д. К средствам для оптимизации функционирования компьютерных сетей относятся anylogic [2], cisco packet tracer [3] и др. Однако с помощью этих средств нельзя исследовать особенности функционирования протоколов транспортного уровня из-за минимального набора параметров в реализациях моделей.

Вторая группа средств представлена следующими симуляторами сетей:

- OMNeT++ [4] (бесплатен для некоммерческого использования);
- NS-2 (Network Simulator 2) [5] — основное средство для моделирования протоколов транспортного уровня;
- NS-3 (Network Simulator 3) [6] — современный аналог NS-2;
- Opnet modeler [7] (бесплатен для использования в образовательных целях).

Основные характеристики данных средств моделирования протоколов приведены в таблице.

Сравнение средств моделирования протоколов и сетей передачи данных

| Характеристика | OMNeT++ | NS-2 | NS-3 | Opnet modeler |
|---|---|---|---|---|
| Язык программирования | C++ | NS-2 использует биазывковую модель, в которой ядро реализовано на C++, а сценарии, описывающие топологию сети и динамику процессов, создаются на oTCL | NS-3 полностью реализован на C++. Также существует некоторая ограниченная поддержка Python в описании моделей и визуализации результатов | Proto-C |
| Производительность | Высокая из-за использования в коде моделей языка C++ | В целом, NS-2 уступает по производительности, поскольку существует связь oTCL и C++ и издержки на интерпретацию oTCL-сценария | NS-3 работает лучше, чем NS-2, за счет модели управления памятью. Система предотвращает агрегацию ненужных параметров, и пакеты не содержат неиспользуемого зарезервированного пространства в заголовке | Высокая |
| Представление результатов моделирования | Встроенные средства для отображения результатов моделирования | NS-2 поставляется с пакетом NAM (Network Animator), представляющим собой основанную на Tcl систему визуализации результатов моделирования | NS-3 использует пакет PyViz — систему визуализации реального времени, написанную на Python | Встроенные средства для отображения результатов моделирования |

По целому ряду параметров протоколов транспортного уровня все перечисленные продукты идентичны. Наиболее полным набором обладают среды NS-2 и OMNeT++. Однако стоит отметить, что все перечисленные средства не позволяют реализовать динамическое управление окном получателя, что существенно снижает их эффективность в качестве инструмента для исследования транспортных протоколов. Добавление данного алгоритма управления перегрузкой требует наличия открытого кода, что ограничивает выбор двумя средствами — NS-2 и NS-3. Однако временные затраты на модификацию исходных кодов данных средств моделирования в совокупности с необходимостью реализации подсчета среднего окна получателя для оценки вероятности осуществления атак класса hijacking оказываются значительными. Поэтому авторами было предложено собственное дискретно-событийное средство моделирования протоколов и алгоритмов управления перегрузкой, написанное на языке C#.

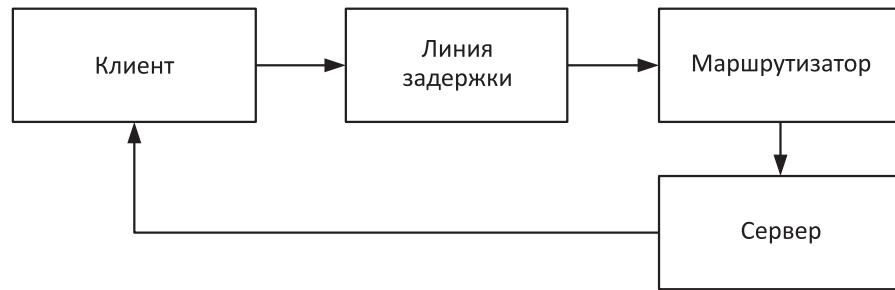
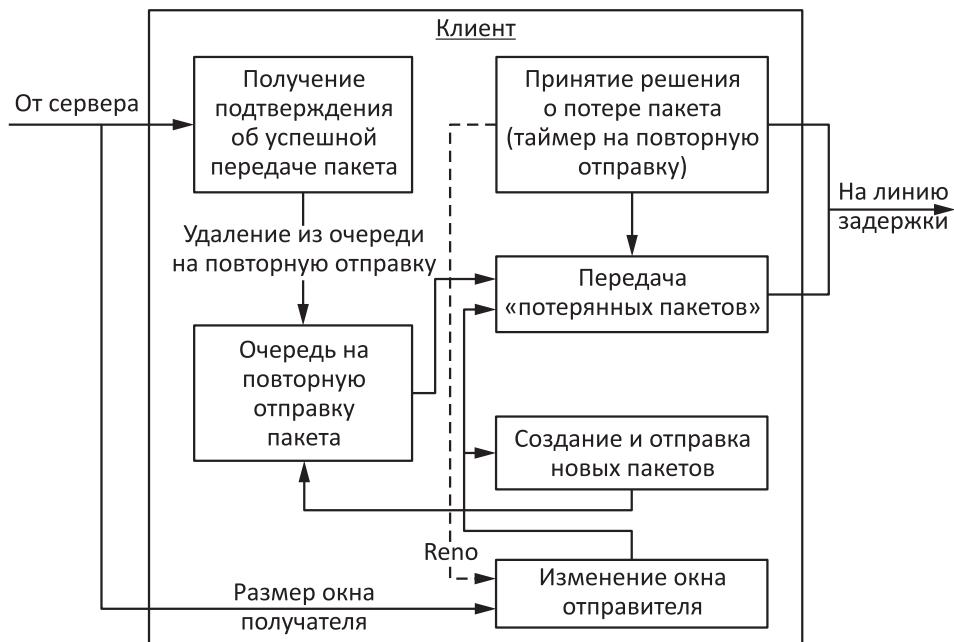
Особенностью разработанной программной модели является графическое представление процессов, происходящих в сети, с расчетом среднего значения скользящего окна. Данное средство учитывает динамические изменения пропускной способности канала, величины RTT, а также воздействие друг на друга нескольких информационных потоков. Реализация программной модели базируется на существующих компонентах среды .NET Framework (Buffer, Thread). В дальнейшем использование разработанной среды моделирования позволит упростить разработку и оптимизацию алгоритмов управления перегрузкой в современных информационно-телекоммуникационных системах и сетях, что, в свою очередь, повысит эффективность проектирования, модернизации и поддержания работоспособности таких систем. Далее будет рассмотрена структура программной модели, а также приведены основные этапы ее реализации.

3 Структура и основные компоненты программной модели

Имитация процесса передачи данных требует наличия в предлагаемой программной модели четырех основных компонентов: клиента, сервера, маршрутизатора (узкого места сети) и линии задержки. Клиент будет формировать пакеты и отслеживать скорость передачи данных в сеть. Сетевая среда моделируется на маршрутизаторе в виде очереди из пакетов, которые поступают от клиента и передаются через элемент «буфер» на сервер, который, в свою очередь, обрабатывает принятые пакеты и посыпает клиенту подтверждения. Линия задержки располагается между клиентом и маршрутизатором. Ее главное предназначение — имитировать движение пакета по сети (осуществлять случайные потери пакетов и вносить задержку на передачу пакетов по сети). Структура модели приведена на рис. 1.

В первую очередь рассмотрим клиентскую часть модели, представленную на рис. 2.

Изначально на клиентской стороне происходит передача новых пакетов. Одновременно с передачей эти пакеты добавляются в очередь на повторную

**Рис. 1** Структурная схема разработанной имитационной модели**Рис. 2** Клиентская часть модели

отправку. Если подтверждение от сервера о приеме пакета не приходит в течение времени повторной передачи, то данный пакет передается повторно, а окно отправителя уменьшается в 2 раза в случае применения алгоритма управления перегрузкой «Reno», который является стандартизованным для использования в протоколах транспортного уровня. Пока очередь пакетов на повторную передачу не пуста, будут передаваться «потерянные» пакеты, и лишь после этого будут передаваться новые пакеты. Если пришло подтверждение об успешном приеме, то данный пакет удаляется из очереди на повторную отправку.

**Рис. 3** Структура модели маршрутизатора

От клиента пакеты передаются на линию задержки, которая помещает пакеты в буфер большого размера (больше буфера маршрутизатора) и приостанавливает их передачу на некоторое время $t_{\text{пред}}$. Это время задается пользователем и может являться как фиксированной, так и случайной величиной. Оно составляет большую часть величины RTT. Затем вносятся случайные потери пакетов, которые имитируют повреждения пакета на физическом и канальном уровне, а также редкие потери от перегрузок на различных маршрутизаторах в сети, не являющихся узким местом. После прохождения линии задержки пакеты поступают на маршрутизатор, схема работы которого показана на рис. 3.

При получении пакета от линии задержки данный пакет добавляется в буфер пакетов на отправку. Если очередь пакетов пустая, то маршрутизатор передает пакеты серверу. Также маршрутизатор вносит свою случайную задержку из-за наличия очереди и конечного времени обслуживания пакета.

Для предотвращения переполнения очереди маршрутизатора было принято решение использовать алгоритм RED (Random Early Detection). Алгоритм RED предполагает более адекватное обслуживание очереди в случае перегрузок в сетях по сравнению с алгоритмом Tail Drop. Он реализует прореживание очереди пакетов еще до того момента, как заполнится буфер. Это заставляет протокол транспортного уровня плавно снижать скорость передачи и предотвращает волны синхронизаций (фрактальный процесс). В результате данные передаются с высокой скоростью, а размер очереди и задержки поддерживаются на разумном уровне [8].

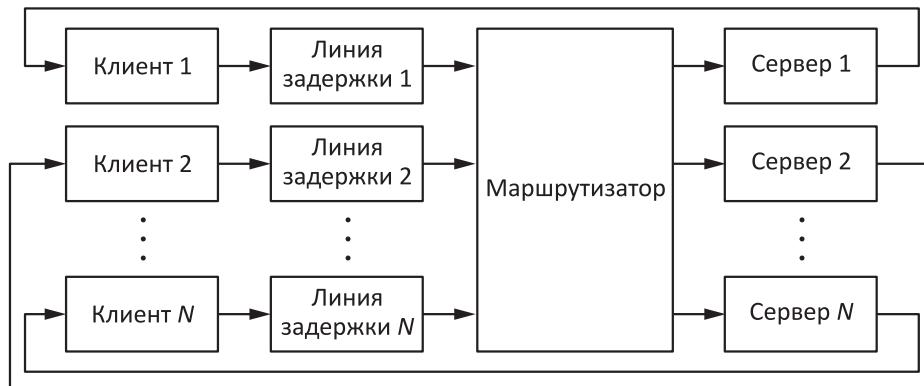
От маршрутизатора пакеты передаются серверу. Схема работы серверной части изображена на рис. 4.

Для упрощения реализации модели в силу симметричности процесса передачи данных относительно маршрутизатора и линии задержки будем считать, что ответ

**Рис. 4** Серверная часть программной модели

от сервера к клиенту приходит мгновенно. Основные параметры соединения (значение RTT, времени на повторную передачу RTO — retransmission timeout) также будут передаваться от сервера, на котором они вычисляются, к клиенту. Значение RTT определяется на основе временной метки, выставленной клиентом. Величина $RTO = 2RTT$. Расчет окна получателя производится на основе оценки значений RTT и B (пропускной способности канала передачи данных между клиентом и сервером). Для более точной оценки текущего значения RTT выбран вариант подсчета минимального значения RTT_{min} на интервале времени, соразмерном с данной величиной, а для оценки пропускной способности канала B используется оценка числа пакетов N размера MSS, полученных за время RTT_{min} сервером:

$$B = \kappa \frac{N \cdot MSS}{RTT_{min}}, \quad \kappa > 1.$$

**Рис. 5** Многопользовательская модель системы передачи данных

Особый интерес представляет моделирование множества соединений, проходящих через маршрутизатор, который будет являться для них узким местом (рис. 5). Ряд соединений будет краткосрочным (за время жизни передается несколько десятков и сотен пакетов), другая же часть просуществует от начала и до конца моделирования (намного больше времени моделирования передачи данных между клиентом 1 и сервером 1, которые представляют интерес при исследовании характеристик окна получателя). Краткосрочные соединения могут появляться и завершаться в любой момент времени, а также иметь различные значения RTT.

4 Особенности программной реализации модели

Программная реализация модели состоит из следующих компонентов:

- маршрутизатор (поток MiddleToServer);
- клиент (поток ClientToMiddle);
- сервер (поток Server);
- интерфейс для отображения размера окна перегрузок в процессе моделирования системы передачи данных (компонент chart платформы .NET Framework);
- форма для ввода параметров и отображения результатов моделирования (рис. 6).



Рис. 6 Пример моделирования процесса передачи данных (одна пара клиент–сервер)

При нажатии на кнопку «Старт» запускается поток маршрутизатора MiddleToServer и поток TimerThread, который отсчитывает время. Поток TimerThread пришлось ввести для срабатывания таймера при большом числе потоков (много-пользовательский режим работы модели, при котором моделируются два и более сетевых соединения). Маршрутизатор в свою очередь передает пакеты серверу в зависимости от интенсивности обработки пакетов потока MiddleSpeed, а также добавляет пакетам поле _timeEnd, которое означает время принятия пакета сервером. Маршрутизатор работает по алгоритму RED с использованием спроведливой очереди и отправляет по 1 пакету с каждой очереди, созданной для хранения пакетов от одного из клиентов, циклически.

Основной трудностью при реализации программной модели оказалась синхронизация потоков клиента и маршрутизатора. Возникали проблемы с блокировками очередей на маршрутизаторе при его одновременной работе с клиентом и сервером. Для решения данной проблемы маршрутизатор и клиент периодически «засыпают» на срок от 10 до 100 мс. За это время сервер успевает обработать поступившие к нему пакеты и отправить клиенту подтверждения.

Долгосрочные и краткосрочные соединения начинают функционировать в зависимости от того, какое время запуска им было определено при инициализации компонентов модели. Для генерации новых клиента и сервера поток маршрутизатора вызывает функцию GenerateThread. В функции GenerateThread создаются 2 потока (клиент (ClientToMiddle) и сервер (Server)) и соответственно создаются очереди в буфере. Поток DynamicThread создается в том случае, если был выбран новый алгоритм изменения скользящего окна на основе управления окном получателя [9].

Поток ClientToMiddle задает уникальный адрес каждому клиенту. В соответствии с этим уникальным адресом клиента каждый сервер получает свой индивидуальный адрес.

Поток Server принимает пакеты. Он производит расчет величин RTT и RTO, а также вызывает функцию CalcWindSize в том случае, если используется алгоритм управления перегрузкой на основе размера окна получателя. Также сервер генерирует ответы клиенту с номерами полученных пакетов.

Функция CalcWindSize производит расчет окна в случае использования алгоритма управления перегрузкой на основе размера окна получателя. Данная функция собирает статистику количества полученных пакетов на цикле RTT и далее рассчитывает размер окна получателя.

Особенности расчета параметров RTT, RTO и окна получателя заключаются в том, что точность измерения этих величин зависит от шага квантования на компьютере. Обычно шаг квантования равен 15 мс, но для повышения точности моделирования приходится уменьшать его до 1 мс при помощи утилиты TimerTool [10].

Линия задержки реализуется уменьшением значения временной метки создания пакета, генерируемого клиентом, на задаваемое при запуске модели время (параметр «случайная задержка»). Также при передаче пакета на маршрутиза-

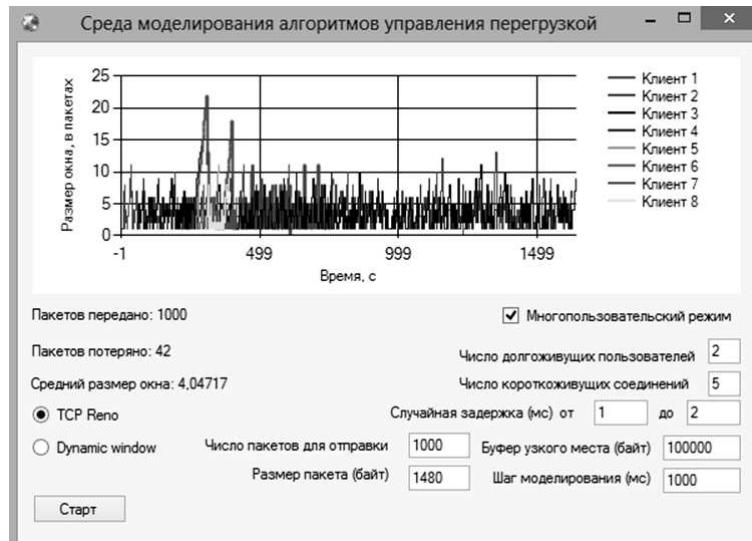


Рис. 7 Многопользовательский режим работы программной среды

тор клиент может реализовать потерю пакета, имитируя повреждение пакета на канальном уровне.

В силу того, что разработанная программная модель функционирует на компьютере и на нее налагаются ограничения, связанные с памятью, процессорным временем и иными факторами, необходимо ввести специальный параметр — шаг моделирования. Он позволит уменьшить требования к ресурсам системы, увеличив на данную величину время моделирования. Этот параметр также влияет на время блокировки потоков клиента, сервера и маршрутизатора.

Во время работы программы производится подсчет количества переданных и потерянных пакетов, а также рассчитывается средний размер скользящего окна. Во входных данных можно задать время случайной задержки на маршрутизаторе, количество пакетов для отправки, размер пакета и длину очереди на маршрутизаторе.

Для многопользовательского режима (рис. 7) есть возможность выбрать количество короткоживущих и долгоживущих соединений. В многопользовательском режиме для каждого отправителя и получателя определяется свой адрес. Передача ведется через один маршрутизатор, при этом он работает по алгоритму «справедливая очередь». Для каждой группы клиент–сервер создается отдельная независимая очередь пакетов, ожидающих отправки. Маршрутизатор просматривает очереди циклически и отправляет соответствующий пакет каждому из серверов.

5 Верификация разработанной имитационной модели

Для проверки и подтверждения адекватности разработанной имитационной модели воспользуемся формулой из статьи [11] для вычисления средней скорости передачи данных при использовании алгоритма управления перегрузкой протокола TCP «Reno»:

$$B(p) = \frac{1}{RTT\sqrt{2bp/3} + T_0 \min(1, 3\sqrt{3bp/8}) p (1 + 32p^2)}, \quad (1)$$

где b — среднее значение окна перегрузки; T_0 — время наступления тайм-аута; p — вероятность потери пакета; $B(p)$ — средняя скорость передачи данных.

Было проведено 10 экспериментов с различными значениями параметров модели (случайной задержки, числа короткоживущих и долгоживущих соединений, размера буфера), которые показали незначительное (не более 10%) расхождение между результатами измерения средней скорости передачи данных при имитационном моделировании и вычислений по формуле (1). Поэтому будем считать, что модель построена корректно и ее можно использовать для оценки эффективности предложенного в работе [9] способа управления доставкой сетевых пакетов с использованием окна получателя.

6 Заключение

В статье были показаны основные этапы разработки программной модели для имитации процесса передачи данных на транспортном уровне. Результатом стало создание имитационной модели с двумя алгоритмами управления перегрузкой — «Reno» и предложенным в [9] способом, который авторы назвали «Dynamic window». В работе описаны основные элементы программной реализации, а также указаны особенности разработанной модели — алгоритм RED и методы подсчета RTT и пропускной способности. Новым подходом, использованным при разработке данной модели, является применение механизма взаимодействия множества потоков и их синхронизации для имитации основных элементов информационно-телекоммуникационной системы — клиента, сервера и маршрутизатора. Для корректного проведения исследований и оптимизации алгоритма «Dynamic window» была произведена верификация разработанной модели на алгоритме «Reno», который является основой для первого алгоритма.

Разработанная модель позволит провести более полное исследование протоколов транспортного уровня, использующих алгоритмы управления перегрузкой. В дальнейшем возможно совершенствование разработанной модели и добавление дополнительного функционала в части новых, более эффективных алгоритмов управления перегрузкой.

Литература

1. Netem. <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/netem>.
2. AnyLogic: Многоподходное имитационное моделирование. <http://www.anylogic.ru>.
3. Cisco packet tracer. <https://www.netacad.com/ru/web/about-us/cisco-packet-tracer>.
4. OMNeT++: Discrete event simulator. <http://www.omnetpp.org>.
5. The network simulator — NS-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
6. NS-3. <http://www.nsnam.org>.
7. Riverbed application and network performance management solutions. <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html>.
8. Алгоритмы RED и WRED. <http://www.intuit.ru/studies/courses/9/9/lecture/281?page=2>.
9. Соловьев В. И., Карпухин Е. О., Гасанов Э. О. Способ управления доставкой сетевых пакетов на стороне получателя для повышения эффективности информационного взаимодействия в телекоммуникационных системах // Системы высокой доступности, 2014. № 2. С. 33–37.
10. TimerTool: Little tool to get and set the windows timer values. <https://github.com/tebjan/TimerTool>.
11. Padhye J., Firoiu V., Towsley D., Kurose J. Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation. <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/1998/tp/paper25.pdf>.

Поступила в редакцию 05.09.14

SPECIALIZED SOFTWARE MODEL TO SIMULATE DATA TRANSFER IN TRANSPORT LEVEL WITH THE CONGESTION CONTROL ALGORITHM

E. O. Karpukhin, V. V. Karnacov, and S. V. Filipkov

Design Information Technologies Center, Russian Academy of Sciences, 7a Marshal Biryuzov Str., Odintsovo, Moscow Region 143000, Russian Federation

Abstract: This paper considers the main approaches to the assessment of efficiency transport layer protocols in modern information and telecommunication systems that implement the congestion control mechanism. The analysis of existing modeling tools for transport layer protocols was carried out, based on which it was concluded that it is impossible to fully take into account the peculiarities of simulation process data. The paper illustrates the main steps of development of the specialized software model in the .NET Framework. The paper proves the value of the sales model based on comparison of the resulting simulation results with existing estimates data rate at the transport layer using the TCP protocol.

Keywords: transport layer; congestion control; TCP; protocol optimization of data-driven interaction; specialized programming model; hijacking

DOI: 10.14357/08696527150204

Acknowledgments

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 14-07-31247 mol_a).

References

1. Netem. Available at: <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/netem> (accessed August 24, 2014).
2. AnyLogic: Mnogopodkhodnoe imitatsionnoe modelirovaniye [AnyLogic: Several of the approach simulation]. Available at: <http://www.anylogic.ru/> (accessed August 24, 2014).
3. Cisco packet tracer. Available at: <https://www.netacad.com/ru/web/about-us/cisco-packet-tracer> (accessed August 24, 2014).
4. OMNeT++: Discrete event simulator. Available at: <http://www.omnetpp.org/> (accessed August 24, 2014).
5. The network simulator—NS-2. Available at: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (accessed August 25, 2014).
6. NS-3. Available at: <http://www.nsnam.org/> (accessed August 25, 2014).
7. Riverbed application and network performance management solutions. Available at: <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html> (accessed August 27, 2014).
8. Algoritmy RED i WRED [Algorithms RED and WRED]. Available at: <http://www.intuit.ru/studies/courses/9/9/lecture/281?page=2> (accessed August 27, 2014).
9. Solodovnikov, V. I., E. O. Karpukhin, and E. O. Gasanov. 2014. Sposob upravleniya dostavkoj setevykh paketov na storone poluchatelya dlya povysheniya effektivnosti informatsionnogo vzaimodeystviya v telekommunikatsionnykh sistemakh [Method of controlling the delivery network packets at the receiver to improve the efficiency of data-driven interaction in telecommunication systems]. *Sistemy Vysokoy Dostupnosti* 2:33–37.
10. TimerTool: Little tool to get and set the windows timer values. Available at: <https://github.com/tebjan/TimerTool> (accessed August 29, 2014).
11. Padhye, J., V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose. Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation. Available at: <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/1998/tp/paper25.pdf> (accessed August 27, 2014).

Received September 5, 2014

Contributors

Karpukhin Eugene O. (b. 1987) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Design Information Technologies Center, Russian Academy of

Sciences, 7a Marshal Biryuzov Str., Odintsovo, Moscow Region 143000, Russian Federation; info@ditc.ras.ru

Karnacov Victor V. (b. 1947) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Design Information Technologies Center, Russian Academy of Sciences, 7a Marshal Biryuzov Str., Odintsovo, Moscow Region 143000, Russian Federation; info@ditc.ras.ru

Filipkov Sergey V. (b. 1984) — senior scientist, Design Information Technologies Center, Russian Academy of Sciences, 7a Marshal Biryuzov Str., Odintsovo, Moscow Region 143000, Russian Federation; info@ditc.ras.ru

НОВЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО КЛЮЧА ИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОДПИСИ

B. V. Кузнецов¹

Аннотация: Существующие алгоритмы симметричного шифрования требуют хранения секретного ключа. Проблема хранения ключей состоит в том, что их часто защищают неудачно выбранными паролями или пин-кодами. В качестве возможного решения рассматривается объединение биометрии с криптографией. В статье описывается новый метод преобразования динамической биометрической подписи в двоичный вектор, который может быть использован в качестве устойчивого ключа. Метод основывается на схеме, называемой защищенным скетчем (secure sketch), и позволяет получать 16-битные ключи с уровнем ошибок ложного допуска и ложного недопуска менее 10%.

Ключевые слова: биометрическая криптография; динамическая подпись; нечеткий экстрактор; защищенный скетч

DOI: 10.14357/08696527150205

1 Введение

Объединение биометрии и криптографии позволяет расширить возможности применения аутентификации по почерку. Для подобного объединения существуют универсальные схемы и теоретическая основа, гарантирующая защищенность получающихся криптоконструкций. Однако имеющийся опыт построения подобных систем (в частности, для биометрии отпечатка пальца [1]) показывает, что реализация этих схем сопряжена с определенными трудностями. Наиболее сложным этапом построения биокриптографической системы является разработка метода преобразования шаблона биометрической характеристики в двоичный вектор повторяемым образом.

Исследование существующей литературы показало, что тема построения защищенных биометрических систем на основе динамической подписи представлена работами, основывающимися на схеме «нечеткого хранилища» (fuzzy vault) [2–4]. Ключевая идея нечеткого хранилища заключается в том, что на подписи находятся особые точки — самопересечения и перегибы, координаты которых защищаются посредством смешивания с маскирующими точками; задача идентификации при этом — отделение особых точек от маскирующих при помощи предъявленного образца подписи. Использование нечеткого хранилища связано с высокой изменчивостью картины каллиграфической подписи на фоне относительной стабильности координат особых точек. Вместе с тем представляет интерес

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

использование всей подписи целиком. В теории для защиты непрерывных сигналов служит подход, называемый нечетким экстрактором. Стоит заметить, что в работах отечественных исследователей подобная задача решается альтернативным подходом с использованием нейронных сетей [5], однако практическая реализация сталкивается с не всегда предсказуемой задачей обучения нейросети. В этой связи представляется перспективным разработать метод преобразования каллиграфической биометрической подписи в вектор на базе защищенного скетча (secure sketch) — алгоритма, применяемого в составе нечеткого экстрактора.

В работе для достижения поставленной цели, во-первых, предложен способ преобразования динамической подписи в двоичный вектор фиксированной длины, во-вторых, разработана схема преобразования динамической подписи в ключ, использующая представление подписи в виде двоичного вектора фиксированной длины.

2 Алгоритм преобразования динамической подписи в ключ

2.1 Динамическая подпись

Таблица 1 Фрагмент шаблона динамической подписи

| X | Y | P | T |
|------|------|-----|-----|
| 2918 | 1735 | 188 | 0 |
| 2907 | 1720 | 210 | 0 |
| 2897 | 1701 | 235 | 0 |
| 2887 | 1679 | 300 | 16 |
| 2879 | 1656 | 297 | 0 |
| 2869 | 1627 | 288 | 0 |
| 2863 | 1597 | 265 | 16 |
| 2853 | 1563 | 225 | 0 |
| 2849 | 1529 | 161 | 0 |
| 2850 | 1506 | 53 | 15 |
| 2841 | 1484 | 0 | 0 |
| 2813 | 1404 | 108 | 156 |
| 2824 | 1367 | 121 | 0 |

Динамическая подпись задается последовательностью так называемых отсчетов. Отсчеты содержат значения пространственных координат X, Y пера планшета в данный момент времени T , а также силы нажатия P . Пример нескольких отсчетов приведен в табл. 1.

Иными словами, шаблон подписи A задается следующим образом:

$$A = \{(x_i, y_i, p_i, t_i), i = 1, \dots, n\}. \quad (1)$$

Подпись может быть сегментирована на один или несколько непрерывных штрихов. Штрихом называется последовательность отсчетов, во время которых перо неотрывно следует по поверхности планшета. Эта последовательность характеризуется ненулевым давлением пера. Сегментация подписи на отдельные штрихи востребована для выравнивания зарегистрированной и предъявленной подписи.

2.2 Выравнивание подписей

Аутентичные подписи в разных предъявлении могут различаться по геометрическому смещению, по повороту и по скорости. Отчасти с этим можно бороться выбором метода преобразования в двоичный вектор, однако в процессе экспериментов возникло предположение, что смещение между отдельными штрихами внутри одной подписи может заметно влиять на точность системы.



Рис. 1 Выравнивание штрихов. Кружками отмечены центры масс

Для борьбы с этим используется выравнивание штрихов. Выравнивание состоит только в коррекции смещения.

Для выравнивания на этапе регистрации у каждого штриха вычисляется и сохраняется центр масс — среднее арифметическое пространственных координат входящих в него отсчетов. На этапе идентификации происходит повторное вычисление центров масс. Полученные центры сопоставляются с зарегистрированными, вычисляется смещение, и на основе полученных значений производится выравнивание (рис. 1).

В случае если количество штрихов в зарегистрированной и предъявленной для идентификации подписи не совпадает, выравнивание не производится.

2.3 Построение зашумленного биометрического двоичного вектора

Для преобразования подписи в ключ, как было отмечено выше, разумно использовать подход, называемый защищенным скетчем. Его основная идея — объединение двух этапов, а именно: преобразование образца в зашумленный двоичный вектор и последующая борьба с шумом посредством использования дополнительной информации, получаемой алгоритмом помехоустойчивого кодирования на этапе регистрации. При этом если получаемые вектора удовлетворяют ограничениям на равновероятность битов, то такие вектора могут использоваться для построения нечеткого экстрактора [1].

В качестве основы алгоритма преобразования в зашумленный двоичный вектор предлагается использовать алгоритм идентификации по статической подписи, описанный в работе [6]. В указанной работе пространственные координаты нормируются независимо друг от друга в диапазон $[0, 1]$. Затем для каждой пары отсчетов вычисляется расстояние

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad i, j = 1, \dots, n.$$

Значения расстояний записываются в матрицу расстояний $R = (r_{ij})$:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \ddots & r_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix}.$$

Аналогичным образом можно построить матрицу расстояний для динамической подписи.

Таким образом, для сравнения подписей достаточно сравнить соответствующие им матрицы расстояний. Матрица расстояний обладает преимуществами — она инвариантна к сдвигу, повороту, растяжениям, а также устойчива к другим типам искажений.

Переход к сравнению матриц расстояний, однако, не решает проблемы различного количества отсчетов в сравниваемых подписях. С этим можно бороться как интерполяцией матрицы R , так и передискретизацией последовательности отсчетов. В данной работе борьба с переменным размером матрицы расстояний осуществлялась посредством ресемплирования последовательности отсчетов (1) до фиксированного n . Для этих условий была построена усредненная матрица R_{avg} , полученная как среднее арифметическое всех шаблонов базы. Это позволило производить простую и устойчивую пороговую бинаризацию матрицы расстояний R , при этом в качестве порога использовалась матрица R_{avg} . Зашумленный биометрический двоичный вектор v строился при помощи перенумерации элементов бинаризованной R .

Используемые нечетким экстрактором векторы должны иметь равное распределение нулевых и единичных битов на генеральной совокупности. Значит, матрица расстояний R будет удовлетворять необходимым требованиям только после нормализации.

Для нормализации была вычислена усредненная (по частной базе данных) матрица расстояний R_{avg} . Она приведена на рис. 2.

Нормализованная матрица расстояний, таким образом, получалась как отношение значений вычисленной матрицы расстояний к соответствующим значениям R_{avg} , причем если результатирующее значение превышало 2, оно полагалось равным 2.

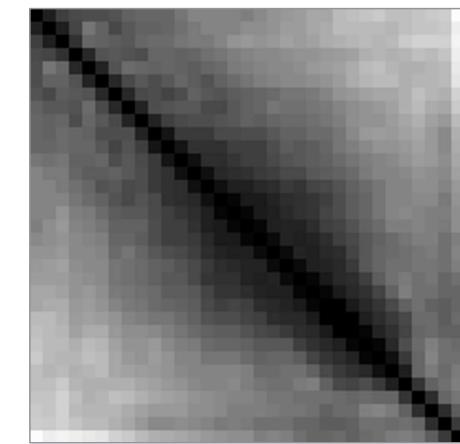


Рис. 2 Усредненная матрица расстояний
матрицы расстояний к соответствующим значениям превышало 2, оно полагалось равным 2.

Полученная нормализованная матрица \bar{R} размера $n \times n$ также может использоваться для определения количественной меры близости двух динамических подписей. Для двух подписей, имеющих матрицы расстояний \bar{R}^1 и \bar{R}^2 , мера близости $d(\bar{R}^1, \bar{R}^2)$ может быть найдена следующим образом:

$$d(\bar{R}^1, \bar{R}^2) = \frac{1}{\sum_{i,j} |\bar{r}_{ij}^1 - \bar{r}_{ij}^2| + \varepsilon}, \quad \varepsilon > 0.$$

Зашумленный биометрический двоичный вектор v строится при помощи перенумерации элементов R , находящихся выше главной диагонали, и их пороговой бинаризацией. Пороговая бинаризация состоит в следующем:

$$v_k = \begin{cases} 0, & \bar{r}_{ij} \in [0, 1]; \\ 1, & \bar{r}_{ij} \in (1, 2]. \end{cases} \quad (2)$$

где k , i и j — соответствующие индексы.

Наконец, для каждого образца динамической подписи строится зашумленный биометрический вектор. Его длина, равная количеству элементов матрицы \bar{R} , расположенных выше главной диагонали, рассчитывается следующим образом:

$$|v| = \frac{n^2 - n}{2}.$$

Например, при $n = 33$ его длина составляет 528 бит.

2.4 Объединение нескольких образцов подписи

Сценарий использования разработанного метода предполагает возможность регистрации нескольких образцов подписи, однако использование их одновременно нецелесообразно из-за требований защищенности. Поэтому требуется разработать схему объединения нескольких образцов. Предлагаемый в данной работе подход состоит в следующем. Для каждого из образцов, предъявленных для регистрации, строится матрица расстояний R^i . Затем производится попарное сравнение полученных матриц и вычисляется сумма мер близости для каждого образца:

$$d_i = \sum_{j=1}^7 d(\bar{R}^i, \bar{R}^j), \quad i \neq j.$$

Образец подписи с минимальным значением d_i , $i = \text{imin}$, отбрасывается как наименее качественный. Образец с максимальным d_i используется как эталон, и информация для выравнивания штрихов берется из него. После этого матрицы всех образцов, кроме откинутого, усредняются:

$$R = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m R^i, \quad i \neq \text{imin}.$$

Перенумерация и бинаризация v производится как в (2).

2.5 Преобразование биометрии в ключ с использованием нечеткого экстрактора

Нечеткий экстрактор — это название подхода, предназначенного для преобразования биометрического (а значит, зашумленного) двоичного вектора фиксированной длины повторяемым образом в случайный вектор. Отличительной особенностью подхода является использование при идентификации дополнительной информации (открытого хелпера), получаемой на этапе регистрации.

Основные проблемы при построении систем идентификации на базе нечеткого экстрактора — выбор информативных признаков и разработка способа представления пользовательского шаблона в виде двоичного вектора фиксированной длины — были решены выше.



Рис. 3 Блок-схема нечеткого экстрактора для биометрии подписи: (а) этап регистрации; (б) этап идентификации

Общая схема нечеткого экстрактора для биометрии почерка абсолютно аналогона таковой для других биометрических характеристик вроде радужной оболочки или отпечатка пальца. На рис. 3 приводятся схемы этапов регистрации и идентификации.

Далее приводится подробное описание реализации алгоритма преобразования зашумленного двоичного вектора в устойчивый ключ.

2.5.1 Построение открытого хелпера

На этом этапе решается задача объединения пользовательского идентификатора и его биометрической характеристики. Рассмотрим подробно этапы регистрации и верификации.

На этапе регистрации в первую очередь генерируется пользовательский идентификатор k_{id} , который является случайным двоичным вектором. Затем на аутентификационном сервере AS сохраняется пара «идентификатор – имя пользователя». Идентификатор k_{id} кодируется с использованием кодов коррекции ошибок в строку $K = \text{Encode}(k_{\text{id}})$. Эта строка посредством исключающего ИЛИ (XOR) объединяется с зашумленным биометрическим вектором v , построенным для предъявленного образца отпечатка:

$$T = v \oplus K,$$

где \oplus — операция исключающего ИЛИ. Также вычисляются хеш-сумма $H = \text{Hash}(k_{\text{id}})$ и информация для выравнивания штрихов A . Значения H , A и T вместе формируют открытый хелпер.

Рассмотрим теперь этап верификации. Его суть состоит в восстановлении идентификатора k_{id} с использованием предъявленной подписи и хелпера. Для предъявленного изображения почерка строится биометрический вектор v' , который затем исключающим ИЛИ складывается со строкой T из хелпера:

$$K' = v' \oplus T = v' \oplus v \oplus K = K \oplus \text{err}, \quad (3)$$

где err — ошибка, т. е. разница между v' и v , которая мала при предъявлении своего и велика при предъявлении чужого образца подпись. Если она мала, то можно попытаться восстановить идентификатор восстановлением ошибок:

$$k'_{\text{id}} = \text{Decode}(K') .$$

Для полученного k'_{id} вычисляется хеш $H(k'_{\text{id}})$. Если хеш декодированного ключа совпадает с исходным $H(k_{\text{id}})$, то делается заключение о корректности восстановления идентификатора (т. е. ключ восстановлен успешно). Полученный ключ используется для дальнейших операций с персональными данными.

2.5.2 Коррекция ошибок

Из формулы (3) очевидно следует, что ошибки в ключевой информации (из-за ассоциативности исключающего ИЛИ) есть в точности ошибки в характеристическом векторе v , поэтому имеется возможность проанализировать их подробнее. Анализ полученных векторов v на частной базе подписей, содержащей по 10 образцов от 50 чел., показал, что в среднем в них содержится 30,7% ошибочных битов. Это шумовые ошибки, поэтому для борьбы с ними может быть применено кодирование Боуза–Чоудхури–Хоквингема или Адамара.

Реализация помехоустойчивого кодирования Адамара, использованная в эксперименте, позволяла восстанавливать до 25% ошибок, что само по себе недостаточно для полного восстановления ошибок с приемлемой вероятностью, поэтому лучше использовать двухэтапное кодирование. На первом этапе K_{Adam} получим кодированием Адамара, на втором этапе двоичный вектор K получим путем c -кратной репликации (т. е. конкатенацией нескольких одинаковых векторов) вектора K_{Adam} :

$$K = \underbrace{K_{\text{Adam}}, K_{\text{Adam}}, \dots, K_{\text{Adam}}}_c, \quad K = \{0, 1\}^{|v|}.$$

Репликация помогает справиться с избыточным числом ошибок. Ограничением на параметры кодирования является равенство длин K и v . На этапе восстановления в первую очередь производится вычисление K_{Adam} мажорированием. Затем производится декодирование кодов Адамара и, в случае успеха, находится k_{id} .

2.6 Результаты экспериментов

Результаты экспериментов приведены на рис. 4 и в табл. 2.

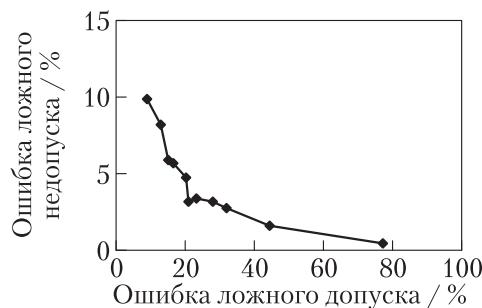


Рис. 4 DET-кривая (Detection Error Tradeoff) ошибок при восстановлении ключа

Таблица 2 Ошибки восстановления ключа

| Длина k_{id} , бит | Ошибка восстановления чужим образцом | Ошибка невосстановления своим образцом |
|----------------------|--------------------------------------|--|
| 16 | 9,6% | 8,9% |
| 16 | 8,1% | 12,7% |
| 18 | 5,6% | 16,3% |
| 21 | 5,7% | 15,0% |
| 22 | 3,0% | 27,9% |
| 24 | 3,1% | 23,0% |
| 26 | 3,0% | 20,7% |
| 29 | 2,3% | 31,9% |

Видно, что для 16-битного ключа ошибка, когда аутентичная подпись не может восстановить ключ, составляет 8,9%, т. е. в 91,1% случаев восстановление происходит успешно. Ошибка ложного допуска тоже не превосходит 10%.

3 Выводы

Полученный способ преобразования позволяет преобразовывать динамическую биометрическую подпись в 16-битный ключ таким образом, что успешное восстановление ключа по предъявлении другого образца той же подписи происходит в 91,1% случаев. При этом ошибка восстановления ключа чужим образцом подписи составляет 9,6%.

Главный результат работы — демонстрация возможности построения защищенной биометрической системы на основе динамической каллиграфической подписи. Полученный результат, в принципе, обладает ограниченной применимостью. Поскольку никаких ограничений на двоичный ключ не накладывается, при длине в 16 бит он может использоваться в качестве замены пин-коду в банковской карте, который традиционно состоит из четырех цифр. Однако длина ключа может быть увеличена совершенствованием отдельных этапов алгоритма.

Литература

1. Ушмаев О. С., Гудков В. Ю., Кузнецов В. В. Алгоритм извлечения бинарного вектора из изображений отпечатков пальцев // Математические методы распознавания образов: Сб. докл. XV Всеросс. конф. — М.: МАКС ПРЕСС, 2011. С. 485–488.
2. Freire-Santos M., Fierrez-Aguilar J., Ortega-Garcia J. Cryptographic key generation using handwritten signature // SPIE Conference on Biometric Technology for Human Identification III Proceedings, 2006. Vol. 6202. P. 225–231. doi: 10.1117/12.665875.
3. Kholmatov A., Yanikoglu B. Biometric cryptosystem using online signatures // Computer and Information Sciences / Eds. A. Levi, E. Savas, H. Yenigün, S. Balcisoy,

- Y. Saygin. — Lecture notes in computer science ser. — Berlin–Heidelberg: Springer, 2006. Vol. 4263. P. 981–990. doi: 10.1007/11902140_102.
4. Freire-Santos M., Fierrez-Aguilar J., Martinez-Diaz M., Ortega-Garcia J. On the applicability of off-line signatures to the fuzzy vault construction // 9th Conference (International) on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007) Proceedings. — IEEE Computer Society, 2007. Vol. 2. P. 1173–1177. doi: 10.1109/ICDAR.2007.195.
 5. Иванов А. И., Фунтиков В. А., Ефимов О. В. Нейросетевая защита биометрических данных пользователя, а также его личного криптографического ключа при локальной и дистанционной аутентификации // Вопросы защиты информации, 2008. № 2(81). С. 25–27.
 6. Ручай А. Н. Инварианты как метод верификации по статической подписи // Знания–Онтологии–Теории (ЗОНТ-09): Мат-лы II Всеросс. конф. с международным участием. — Новосибирск: ИМ СО РАН, 2009. С. 212–215.

Поступила в редакцию 16.02.15

NOVEL METHOD FOR ROBUST KEY GENERATION FROM ONLINE BIOMETRIC SIGNATURE

V. V. Kuznetsov

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

Abstract: Existing symmetric encryption algorithms require storage of the secret key. Stored keys are often protected by poorly selected user passwords or pin-codes. Combining biometrics with cryptography is often assumed as a possible solution. This paper describes a novel method for transforming an online biometric signature into a binary vector, which can be used as a cryptographic key. The method is based on a secure sketch scheme and makes it possible to construct 16-bit keys with false accept rate and false reject rate less than 10%.

Keywords: biometric cryptography; online signature; fuzzy extractor; secure sketch

DOI: 10.14357/08696527150205

References

1. Ushmaev, O., V. Gudkov, and V. Kuznetsov. 2011. Algoritm izvlecheniya binarnogo vektora iz izobrazheniy otpechatkov pal'tsev [Algorithm of the binary vector extraction from fingerprint images]. *Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov: Sb. dokl. XV Vseross. konf.* [15th Conference on Mathematical Methods for Pattern Recognition Proceedings]. Moscow: Maks Press. 485–488.

2. Freire-Santos, M., J. Fiérrez-Aguilar, and J. Ortega-Garcia. 2006. Cryptographic key generation using handwritten signature. *SPIE Conference on Biometric Technology for Human Identification III Proceedings*. 6202:225–231. doi: 10.1117/12.665875.
3. Kholmatov, A., and B. Yanikoglu. 2006. Biometric cryptosystem using online signatures. *Computer and Information Sciences*. Eds. A. Levi, E. Savas, H. Yenigün, S. Balcisoy, and Y. Saygin. Lectures note in computer science ser. Berlin–Heidelberg: Springer. 4263:981–990. doi: 10.1007/11902140_102.
4. Freire-Santos, M., J. Fiérrez-Aguilar, M. Martinez-Diaz, and J. Ortega-Garcia. 2007. On the applicability of off-line signatures to the fuzzy vault construction. *9th Conference (International) on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007) Proceedings*. IEEE Computer Society. 2:1173–1177. doi: 10.1109/ICDAR.2007.195.
5. Ivanov, A., V. Funtikov, and O. Efimov. 2008. Neyrosetevaya zashchita biometricheskikh dannykh pol'zovatelya, a takzhe ego lichnogo kriptograficheskogo klyucha pri lokal'noy i distantsionnoy autentifikatsii [Neural protection of personal cryptographic key and user's biometric template in local and remote authentication]. *Voprosy Zashchity Informatsii* [Information security questions] 2(81):25–27.
6. Ruchaj, A. 2009. Invariandy kak metod verifikatsii po staticheskoy podpisi [Using invariants for verification on offline signature]. *Znaniya–Ontologii–Teorii (ZONT-09): Mat-ly II Vseross. konf. s mezhdunarodnym uchastiem* [2nd Conference on Knowledge–Ontology–Theory (KONT-09) Proceedings]. Novosibirsk: Sobolev Institute of Mathematics RAS. 212–215.

Received February 16, 2015

Contributors

Kuznetsov Vladislav V. (b. 1988) — Candidate of science (PhD) in technology, junior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; vkuznetsov@ipiran.ru

ГЕТЕРОГЕННЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ: МОДЕЛИ КООРДИНАЦИИ И СОГЛАСОВАННОСТИ

И. А. Кириков¹, А. В. Колесников², С. В. Листопад³, С. А. Солдатов⁴

Аннотация: Рассматривается подход к моделированию коллективного принятия решений с использованием компьютерных систем поддержки принятия решений (СППР) в рамках синергетической парадигмы искусственного интеллекта (ИИ). Как показала история развития ИИ, методы, построенные в рамках парадигмы компьютерного моделирования процессов и явлений в памяти одного человека, оказались непригодны для решения сложных практических задач. Они обладают существенной неоднородностью, что требует применения гетерогенных методов для их решения, СППР, с давних времен использующихся для решения подобных задач. В этой связи предложены модели гибридных интеллектуальных систем (ГиИС) с учетом эффектов координации и согласованности, имитирующие поведение реальных СППР. Результаты вычислительных экспериментов с ГиИС, реализующими эффекты координации, демонстрируют их положительное влияние на качество коллективных решений.

Ключевые слова: гетерогенность; система поддержки принятия решений; гибридная интеллектуальная система; координация; согласованность

DOI: 10.14357/08696527150206

1 Введение

Научное направление, связанное с разработкой «умных» компьютеров, зародилось в середине XX в. Однако первые информационные интеллектуальные системы, создатели которых придерживались парадигмы моделирования процессов и явлений в памяти одного человека, оказались непригодны для решения сложных практических задач. Проблема в том, что такие компьютерные технологии — среда реализации методов, а не инструментальное средство их синтеза. На практике сложные задачи в уникальных ситуациях решают СППР (рис. 1) — коллективы экспертов под руководством лица, принимающего решения (ЛПР).

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

² Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, avkolesnikov@yandex.ru

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

⁴ ООО «Лайтон», soldatov@l-on.ru

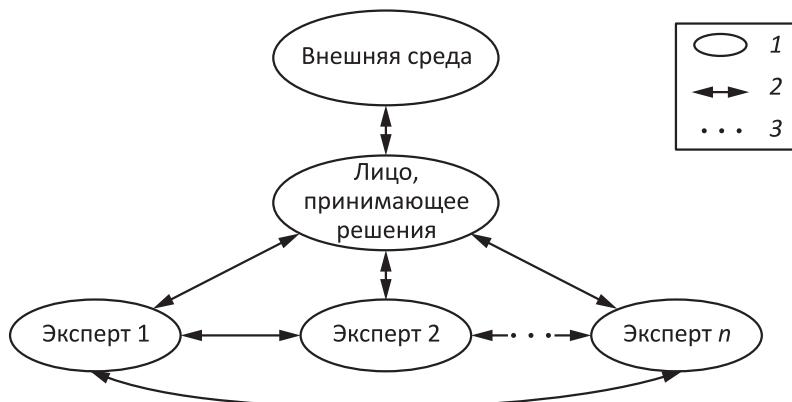


Рис. 1 Концептуальная модель СППР: 1 — участники СППР; 2 — отношения между участниками СППР; 3 — возможность расширения количества экспертов СППР и установления отношений между ними и другими участниками СППР

Взаимодействуя в ходе обсуждения, эксперты обмениваются данными, знаниями, объяснениями и частичными решениями общей задачи. При этом возникает самоорганизация, направляемая отношениями кооперации, компромисса, содействия, конкуренции, приспособления и пр., которая определяет синергетический эффект, когда коллективное, интегрированное решение лучше частных мнений экспертов. Таким образом, по аналогии с экспертными системами, позволившими компьютеру рассуждать «не хуже» одного человека, актуальны программные системы, работающие в условиях сложных задач не хуже коллектива специалистов.

В этой связи к концу XX в. возникают социальная в смысле М. Минского и системная в смысле В. Б. Тарасова парадигмы ИИ. Авторы исходят из того, что отдельно взятая технология ИИ обладает как преимуществами, так и недостатками и только в продуманной комбинации методов и моделей могут возникнуть эмерджентность и синергетический эффект, когда дополнительность и сотрудничество сведут к минимуму частные недостатки и позволят автоматизировано решать сложные задачи практики принятия решений.

Перемены коснулись терминологии, теории, методологии, технологии и практики ИИ. В 1966 г. W. Witsenhausen предложил модель гибридной системы (ГС). В 1978 г. Н. П. Бусленко приступил к разработке унифицированных, междисциплинарных, комбинированных методов и моделей: агрегатов и агрегативных систем. В 1987–1993 гг. усилиями L. Tavernini, A. Nerode, W. Kohn, J. Antsaklis, J. Stiver, M. D. Lemmon, A. Back, J. Guckenheimer, M. A. Myers и R. W. Brockett были разработаны базовые модели ГС. Их развитие в сторону многокомпонентности и связности выполнили M. S. Branicky, V. S. Bonkar и S. K. Mitter в 1994 г. В том же году A. Puri и P. Varaija определили ГС из

координируемых компонентов — гибридных автоматов, а в 1996 г. G. Walsh построил формализм сети ГС. Несколько раньше, в 1983–1986 гг. Я. А. Гельдфандбейн, А. В. Колесников и И. Д. Рудинский разработали многомодельную семиотическую систему, затем Д. А. Поспелов и А. Н. Борисов ввели понятие гибридных экспертных систем, а Г. В. Рыбина — концепцию интегрированных экспертных систем.

Гибридные интеллектуальные системы анонсировал в 1994–1995 гг. L. Medsker. Они, по существу, совпадают с интеллектуальными ГС S. Goonatilake и S. Khebbal (1995 г.), а также гибридными интеллектуальными адаптивными системами, которые ввели N. Kasabov и R. Kozma (1998 г.). В 1998 г. Г. С. Осипов рассмотрел ГС с дискретной частью, основанной на знаниях. В 1997 г. В. Н. Вагин и А. П. Еремеев предложили для поддержки принятия решений семиотическую систему распределенного интеллекта. В том же году С. В. Астанин и В. Г. Захаревич построили модель системы гибридного интеллекта, а в 1998 г. В. Б. Тарасов определил нечеткую эволюционную многоагентную систему. В 1998 г. специалисты компании Philips ввели понятие «ambient intelligence», которое переводится на русский язык как «интеллектуальная среда» или «интеллектуальное пространство». В 1998 г. Ю. Р. Валькман построил исчисление моделей. Подробнее история понятия «гибридизация» изложена в [1].

На рубеже XX и XXI вв. знания о гибридных и синергетических системах изучены, обобщены и опубликованы в работах А. Н. Борисова, М. Г. Гаазер-Раппопорта, Д. А. Поспелова, S. Goonatilake, S. Khebbal, L. Medsker, Г. В. Рыбиной, В. Б. Тарасова, А. В. Гаврилова, Н. Г. Ярушкиной, А. В. Колесникова, И. А. Кирикова, П. М. Клачек и др. [3–13].

В России сложилось несколько школ в этой области междисциплинарных знаний: Д. А. Поспелова – В. Б. Тарасова; В. Н. Вагина – А. П. Еремеева; Г. В. Рыбиной в Москве; Н. Г. Ярушкиной в Ульяновске; В. Ф. Пономарева – А. В. Колесникова в Калининграде.

Цель настоящей работы — отобразить в моделях гетерогенность для релевантности информационных интеллектуальных систем оригинал, а их консультации по качеству сделать не хуже, чем предлагают коллективы, принимающие решения в сложных задачах.

2 Понятие гетерогенности

Категория гетерогенности появилась в ответ на потребности в развитии знаний в таких науках, как физика и химия. Отсюда и общедоступное определение: гетерогенная система (от греческого $\delta\tau\epsilon\rho\zeta$ — разный и $\gamma\acute{\epsilon}\nu\omega$ — рождать) — неоднородная система, состоящая из однородных частей, разделенных поверхностью раздела, разрывами в непрерывности физических свойств. Однородные части могут отличаться друг от друга по составу и свойствам. Физика и химия традиционно применяют это понятие для исследования естественных, природных

систем и создания искусственных объектов и сред с полезными для человека свойствами.

Разнообразие — это признак, проявление гетерогенности. «Где нет жизни — нет идеи; где нет бесконечного разнообразия — нет жизни», — говорил Н. Г. Чернышевский. Разнообразие — общесистемная категория самого верхнего уровня абстракции общих свойств предметов и явлений окружающего мира. Результаты исследования разнообразия С. Биром, У. Р. Эшби, А. Н. Колмогоровым, В. М. Глушковым составили фундамент теории информации и кибернетики, системного анализа и теории управления. Так, У. Р. Эшби утверждал, что только разнообразие может уничтожить разнообразие. В свою очередь, С. Бир в книге «Мозг фирмы» отмечал, что кибернетика научила работать с разнообразием: создавать, оценивать количество, фильтровать и управлять им. Одно из важных следствий закона необходимого разнообразия У. Р. Эшби состоит в том, что управление обеспечивается, если разнообразие средств управляющего не меньше разнообразия управляемой им ситуации. Это достигается благодаря процессам организации и самоорганизации. Сегодня организация ассоциируется с вертикалью управления, а самоорганизация — с горизонтальными коллективами — СППР.

На рис. 2 показано несколько примеров естественных гетерогенных систем, относящихся к разным областям науки. Калининградская школа сконцентрировала свое внимание на СППР [1, 11–13].

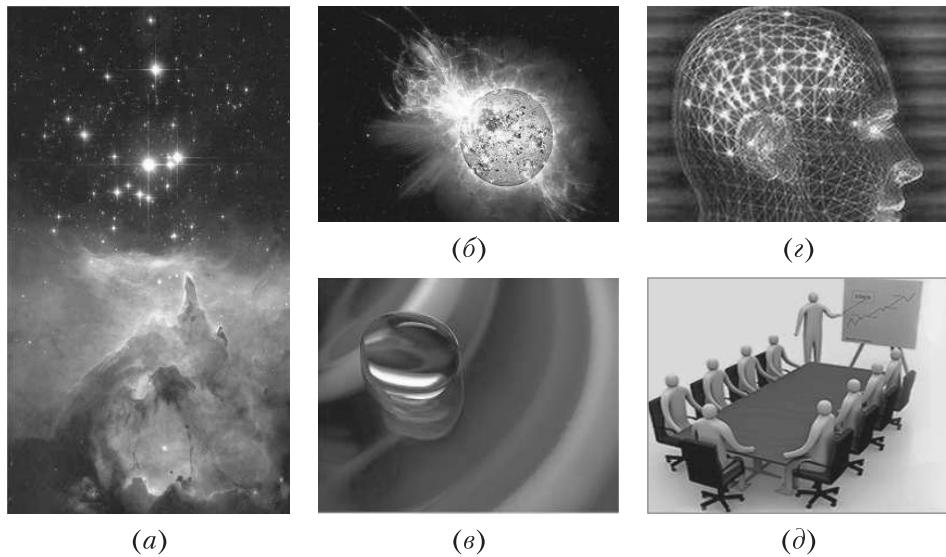


Рис. 2 Примеры естественных гетерогенных систем: (а) область космоса NGC 6357; (б) звезда Солнце; (в) солнечный свет как взаимодействие волн с разной частотой; (г) головной мозг человека; (д) СППР

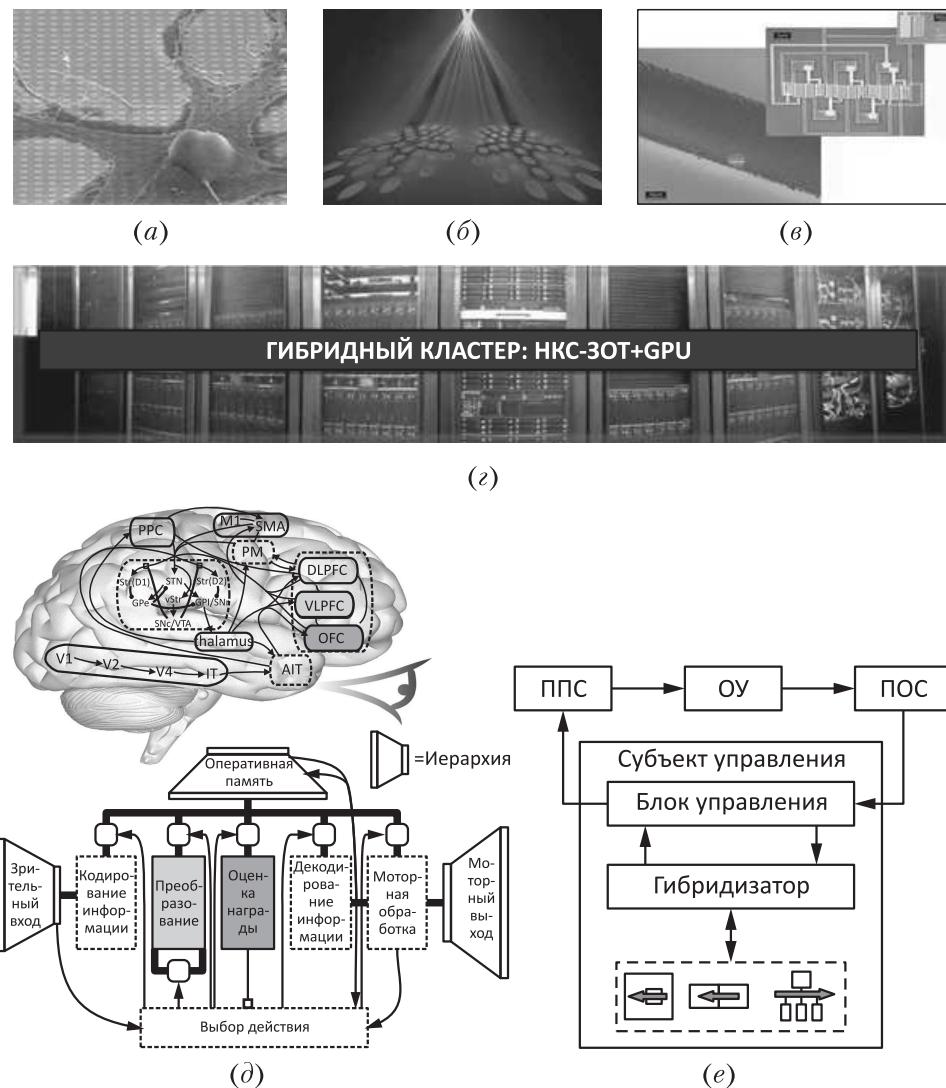


Рис. 3 Примеры искусственных гетерогенных систем: (а) гибрид микросхемы и нейрона крысы; (б) светодиод для преобразования электрической энергии в световую; (в) наномикросхема в сравнении с человеческим волосом; (г) гетерогенный кластер Сибирского отделения РАН; (д) искусственный мозг человека Sraun канадских специалистов; (е) гибридная адаптивная система управления А. В. Колесникова

Искусственные гетерогенные системы создаются человеком в разных сферах деятельности с использованием междисциплинарных знаний в интересах создания объектов с полезными для людей свойствами. На рис. 3 приведены примеры искусственных гетерогенных систем.

Интересные и значимые подходы, релевантные естественным гетерогенным системам, предложены в физике квантово-механических систем и биомолекулярной химии, физиологии и медицине, за крупные достижения в которых вручены Нобелевские премии. Например, Нобелевская премия по физике в 2000 г. присуждена Ж. И. Алферову (Россия), Х. Кремеру (США) за разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокочастотной технике и оптоэлектронике, и Д. Килби (США) за работы в области интегральных схем.

3 Математические модели искусственных гетерогенных систем в информатике

К искусственным гетерогенным информационным системам отнесем: гибридные системы, агрегаты и агрегативные системы, многомодельные системы, интегрированные экспертные и синергетические системы, ГиИС и эмерджентные модели. Ниже рассмотрены ГС, а также ГиИС и синергетические системы Калининградской школы.

Классический вариант ГС — записанная на математическом языке комбинация двух методов, один из которых имеет преимущества в моделировании непрерывных процессов, а другой — дискретных. Ранний результат — это H_W -модель ГС [14]:

$$H_W = \langle M, \Omega, f, d, \omega, J \rangle,$$

где M и Ω — дискретные пространства состояний и выходов соответственно; $f : M \times \Re^n \rightarrow \Re^n$ — непрерывная функция; \Re — множество действительных чисел; \Re^n — пространство непрерывных состояний размерности n ; $d : M \times J \rightarrow M$ — дискретная функция перехода, вычисляющая значение дискретной компоненты состояния, когда значение непрерывной компоненты достигло переходного множества; $\omega : M \rightarrow \Omega$ — функция выхода; $J \in P(\Re^n)$ — множество переходных множеств.

Гибридная система с координацией состоит из компонентов (1) с координацией между ними. Гибридный автомат представлен ниже:

$$H = (L, D, J, \mu, \Delta), \quad (1)$$

где L — множество управляющих позиций; D — связь дифференциального уравнения $D(l)$ с позицией $l \in L$; $J \subset L \times \Re^n$ — множество начальных состояний; μ — связь условия инвариантности $\mu(l) \subset \Re^n$ с позицией l ; $\Delta \subset L \times \Phi \times \Lambda \times L$ — множество ребер; $e = (l, \phi, \lambda, l') \in \Delta$ — ребро из позиции l в позицию l' , помеченное условием необходимости $\phi \in \Phi$ и отношением инициализации $\lambda \in \Lambda$.

Координация трактуется как произведение компонентов $H_i, i = 1, \dots, M$:

$$H = H_1 \otimes \cdots \otimes H_M.$$

Теперь опишем агрегаты и агрегативные системы. Агрегат A_n воспринимает входные $x(t)$, выдает выходные $\phi \in \Phi$ сигналы, находится в состоянии $z(t)$ и задается следующим образом:

$$A_n = \langle T, X, Y, Z, Z^Y, H, U, G \rangle,$$

где T — множество моментов времени; X, Y, Z — множества входных, выходных сигналов и состояний $x(t) \in X, y(t) \in Y, z(t) \in Z$; Z^Y — система подмножеств Z ; H — множество собственных параметров $h(t) \in H$; U и G — операторы переходов и выходов. Агрегат может находиться в обычных и особых состояниях. Из вторых он переходит в новое состояние скачком. При этом оно вычисляется с помощью случайного оператора U , а случайный оператор G определяет принадлежность текущего состояния Z^Y и значение выходного сигнала.

Сложная динамическая система редуцируется и формализуется агрегативной системой:

$$A_N = \left\langle [X_i^n]_N, [Y_j^n]_N, R \right\rangle,$$

где $[X_i^n]_N = \bigcup_{n=0}^N [X_i^n]$ и $[Y_j^n]_N = \bigcup_{n=0}^N [Y_j^n]$ — множества входных и выходных контактов; R — оператор сопряжения.

Многомодельная система определена как объект из N компонентов $K = \{k_i\} | i \in \overline{2, N}$, использующих знания из семантической памяти S и связанных с ней и между собой межмодельным интерфейсом J_μ :

$$H_{GKR} = \langle K, S, J_\mu \rangle.$$

Компонент $k_i \in K$ — функциональная подсистема, реализующая один из N включенных в H_{GKR} методов моделирования.

Функциональная ГИС (ФГИС) — записанная в аксиоматической теории схем ролевых концептуальных моделей система, использующая для решения задачи несколько методов имитации интеллектуальной деятельности человека. Крупнозернистые ФГИС для решения гетерогенной задачи prb^u специфицируются следующей схемой ролевых концептуальных моделей:

$$\begin{aligned} \text{res}_A^u &= R_1^{\text{res met}}(\text{res}_A^u, \text{met}^u) \circ R_1^{\text{res pr}}(\text{res}_A^u, \text{pr}^{ui}) \circ R_1^{\text{res pr}}(\text{res}_A^u, \text{pr}^{uo}) \circ \\ &\circ R_1^{\text{res st}}(\text{res}_A^u, \text{st}^u) \circ R_1^{\text{st st}}(\text{st}^u(t), \text{st}^u(t+1)) \circ R_1^{\text{pr st}}(\text{pr}^{ui}(t), \text{st}^u(t+1)) \circ \\ &\circ R_1^{\text{st pr}}(\text{st}^{up}(t), \text{pr}^{uo}(t)) \circ R_1^{\text{res res}}(\text{RES}^\circ, \text{RES}^\circ) \circ R_1^{\text{pr pr}}(\text{pr}^{ui}, \text{PR}^{\circ i}) \circ \\ &\circ R_2^{\text{pr pr}}(\text{PR}^{\circ o}, \text{pr}^{uo}), \quad (2) \end{aligned}$$

где t — модельное время, $t = 0, 1, 2, \dots$; \circ — конкатенация; res_A^u — ГиИС, ресурс решения неоднородной задачи; met^u — интегрированный метод решения prb^u ; pr^{ui} — исходные данные DAT^u [12] задачи prb^u , передаваемые на вход одного или нескольких элементов res^3 из декомпозиции prb^u задачи prb^u ; pr^{uo} — выход одного или нескольких элементов res^3 из декомпозиции prb^u как цель GL^u решения задачи prb^u ; $\text{st}^u(t)$ — состояние ГиИС; RES^3 — непустое множество как минимум из двух элементов res^3 ; PR^{3i} и PR^{3o} — множества свойств «вход» и «выход» элементов из RES^3 соответственно; $R_1^{\text{st st}}$, $R_1^{\text{pr st}}$ и $R_1^{\text{st pr}}$ — отношения функционирования ГиИС; $R_1^{\text{res res}}$ — отношения интеграции [12] элементов; $R_1^{\text{pr pr}}$ — отношения между входами ГиИС и входами элементов; $R_2^{\text{pr pr}}$ — отношения между выходами элементов и выходами ГиИС. Элемент res^3 решает подзадачи или выполняет вспомогательные операции методом met^3 и имеет свойства $\text{PR}^3 \subseteq \text{PR}$, наиболее важные из которых — «вход» pr^{3i} , «выход» pr^{3o} , а также «состояние» st^3 .

Схема элемента ГиИС выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{res}^3 = & R_1^{\text{res met}} (\text{res}^3, \text{met}^3) \circ R_1^{\text{res pr}} (\text{res}^3, \text{pr}^{3i}) \circ R_1^{\text{res pr}} (\text{res}^3, \text{pr}^{3o}) \circ \\ & \circ R_1^{\text{res st}} (\text{res}^3, \text{st}^3) \circ R_1^{\text{st st}} (\text{st}^3(t), \text{st}^3(t+1)) \circ R_1^{\text{pr st}} (\text{pr}^{3i}(t), \text{st}^3(t+1)) \circ \\ & \circ R_1^{\text{st pr}} (\text{st}^3(t), \text{pr}^{3o}(t)), \quad (3) \end{aligned}$$

где $R_1^{\text{st st}}$, $R_1^{\text{pr st}}$ и $R_1^{\text{st pr}}$ — отношения «состояние—состояние», «вход—состояние», «состояние—выход».

На множестве автономных методов $\text{MET}^3 = \{\text{met}_y^3 | y = 1, \dots, N_{\text{met}}\}$ различаются met_1^3 — аналитические, met_2^3 — нейронные, met_3^3 — нечеткие, met_4^3 — рассуждения на основе опыта, met_5^3 — эволюционные, met_6^3 — статистические и met_7^3 — логические.

Функциональная ГиИС с координацией — новый класс искусственных гетерогенных систем [15]. Его описание получено расширением модели (2)–(3). Координация контролирует промежуточные состояния решения подзадач prb^h [15], т. е. результаты элементов res^3 , и изменяет свойства «вход» pr^{3i} элементов res^3 . Для этого в (2), (3) введено отношение $R_1^{\text{st pr}} (\text{st}^u(t), \text{pr}^{ui}(t+1))$, т. е. по состоянию ФГиИС $\text{st}^u(t)$ меняются исходные данные $\text{pr}^{ui}(t+1)$ для элементов в момент времени $t+1$. Множество $R_1^{\text{st pr}}$ устанавливает отношения между текущим состоянием $\text{st}^u(t)$ гибрида res_A^u (2) и состоянием входов элементов res^3 на следующем шаге. Для изменения входов pr^{3i} элементов res^3 в (3) введено отношение $R_1^{\text{st act}} (\text{st}^u, \text{act}^{3k})$, где $\text{ACT}^{3k} = \{\text{act}_1^{3k \alpha}, \dots, \text{act}_{N_{\text{prt}}}^{3k \alpha}\}$ — координирующие действия в базе знаний B_{ext} . Множество $R_1^{\text{st act}}$ — отношения состояния st^u ФГиИС res_A^u в момент времени t и необходимых координирующих действий ACT^{3k} .

Ниже приведена схема крупнозернистых ФГиИС с координацией:

$$\text{res}_A^u = \text{res}_A^u \circ R_1^{\text{st pr}} (\text{st}^u(t), \text{pr}^{ui}(t+1)) \quad (4)$$

и модифицированная схема элемента ФГиИС:

$$\text{res}^{\exists} = \text{res}^{\exists} \circ R_1^{\text{st act}} (\text{st}^u, \text{act}^{\exists k}) . \quad (5)$$

Отношения $R_1^{\text{st pr}}$ и $R_1^{\text{st act}}$ не задаются априори, а, как и $R_1^{\text{st st}}$, $R_1^{\text{pr st}}$ и $R_1^{\text{st pr}}$, фиксируются при работе ФГиИС и решении k -задачи prb^k [15].

Гибридная интеллектуальная многоагентная система (ГиИМАС) с самоорганизацией на основе анализа согласованности целей агентов совмещает преимущества многоагентных систем и ГиИС, моделирует самоорганизацию СППР и определяется тремя принципами (6)–(8).

Первый из них представляет собой декларативное выражение, определяющее составные элементы ГиИМАС:

$$\text{himas} = \langle \text{AG}^*, \text{env}, \text{INT}^*, \text{ORG}, \{\text{sogoa}\} \rangle , \quad (6)$$

где $\text{AG}^* = \{\text{ag}_1, \dots, \text{ag}_n, \text{ag}^{\text{dm}}\}$ — множество из $n \in \mathbb{N}$ агентов-экспертов ag и агента, принимающего решения (АПР) — ag^{dm} ; env — концептуальная модель внешней среды ГиИМАС; $\text{INT}^* = \{\text{prot}, \text{lang}, \text{ont}, \text{rcl}\}$ — элементы структурирования взаимодействий агентов: prot — протокол взаимодействия, lang — язык сообщений, ont — модель предметной области, rcl — классификатор отношений агентов: нейтралитет, конкуренция и сотрудничество; ORG — множество архитектур ГиИМАС, состоящее из непересекающихся подмножеств архитектур с сотрудничающими ORG_{coop} , с нейтральными ORG_{neut} и с конкурирующими агентами ORG_{comp} : $\text{ORG} = \text{ORG}_{\text{coop}} \cup \text{ORG}_{\text{neut}} \cup \text{ORG}_{\text{comp}}$, $\text{ORG}_{\text{coop}} \cap \text{ORG}_{\text{neut}} = \emptyset$, $\text{ORG}_{\text{coop}} \cup \text{ORG}_{\text{comp}} = \emptyset$, $\text{ORG}_{\text{comp}} \cap \text{ORG}_{\text{neut}} = \emptyset$; $\{\text{sogoa}\}$ — множество моделей макроуровневых процессов в ГиИМАС: sogoa — модель самоорганизации на основе анализа согласованности целей агентов [12]. Каждый агент $\text{ag} \in \text{AG}^*$ характеризуется собственным критерием качества решения поставленной задачи, нечеткой целью [12], которая может отличаться от нечетких целей других агентов, в том числе АПР. Результат работы ГиИМАС во многом зависит от согласованности целей агентов [12], поэтому для повышения качества предлагаемых ГиИМАС решений моделируется ее самоорганизация sogoa , когда АПР, анализируя характеристики поставленной задачи, меняет архитектуру ГиИМАС org .

Второй принцип определяет эмерджентный характер функции ГиИМАС:

$$\text{act}_{\text{himas}} = \left(\bigcup_{\text{ag} \in \text{AG}^*} \text{act}_{\text{ag}} \right) \cup \text{act}_{\text{ia}} \cup \text{act}_{\text{ac}} \cup \text{act}_{\text{col}} , \quad (7)$$

где $\text{act}_{\text{himas}}$ — функция ГиИМАС в целом; act_{ag} — функция агента из множества AG^* ; act_{ia} — функция «анализ взаимодействий» АПР ag^{dm} ; act_{ac} — функция «выбор архитектуры» АПР ag^{dm} ; act_{col} — коллективная функция

ГиИМАС, определяемая архитектурой org, конструируемая динамически. При этом функции агентов act_{ag} реализуются с применением методов, использующих различные интеллектуальные технологии:

$$act_{ag} = (\text{MET}_{ag}, \text{IT}_{ag}), \quad ag \in \text{AG}^*, \quad \left| \bigcup_{ag \in \text{AG}^*} \text{IT}_{ag} \right| \geq 2,$$

где MET_{ag} — множество методов решения задачи агента; IT_{ag} — множество интеллектуальных технологий методов MET_{ag} .

Согласно третьему принципу — принципу рекурсии:

$$ag = ag \vee himas, \quad (8)$$

понятия «агент» и «ГиИМАС» имеют одну и ту же природу, т. е. агент может представлять собой ГиИМАС на более низком уровне рассмотрения.

4 Основные результаты по гетерогенным искусственным системам

Для подтверждения эффективности моделей (2)–(5) исследована задача оперативно-производственного планирования (ОПП) на ООО «Завод «Калининградгазавтоматика» и создана автоматизированная система, моделирующая ежедневные планерки управленческого персонала по составлению производственного плана. Автоматизированное решение задачи ОПП моделировалось с учетом координации и без нее (рис. 4). По оси X отложены месяц и год, для которых проводится моделирование решения задачи ОПП, по оси Y — суммарная стоимость заказов.

На рис. 4 видно, что результаты моделирования решения задачи ОПП без учета координации не соответствуют фактическим. Относительная погрешность результатов решения задачи ОПП без учета координации в среднем достигает 36%. В среднем относительная погрешность результатов решения задачи ОПП с учетом координации по сравнению с результатом работы коллектива людей на ООО «Завод «Калининградгазавтоматика» не превысила 1%. Полученные в ходе проведения экспериментов по решению сложной задачи ОПП с учетом координации рекомендации, отображенные в протоколе планерок, получили высокую оценку экспертов. В результате теоретически обоснована необходимость учета координации при решении сложной задачи ОПП и подтверждена релевантность разработанных моделей сложной задаче ОПП.

Для оценки влияния согласованности целей агентов на качество решений ГиИМАС (6)–(8) проведены серии экспериментов, в которых требовалось решить сложную транспортно-логистическую задачу (СТЛЗ), т. е. найти для нескольких транспортных средств совокупность маршрутов, оптимальную по четырем критериям: суммарной стоимости; общей длительности поездок для всех транспортных средств; вероятности опоздания хотя бы к одному клиенту; надежности. Для

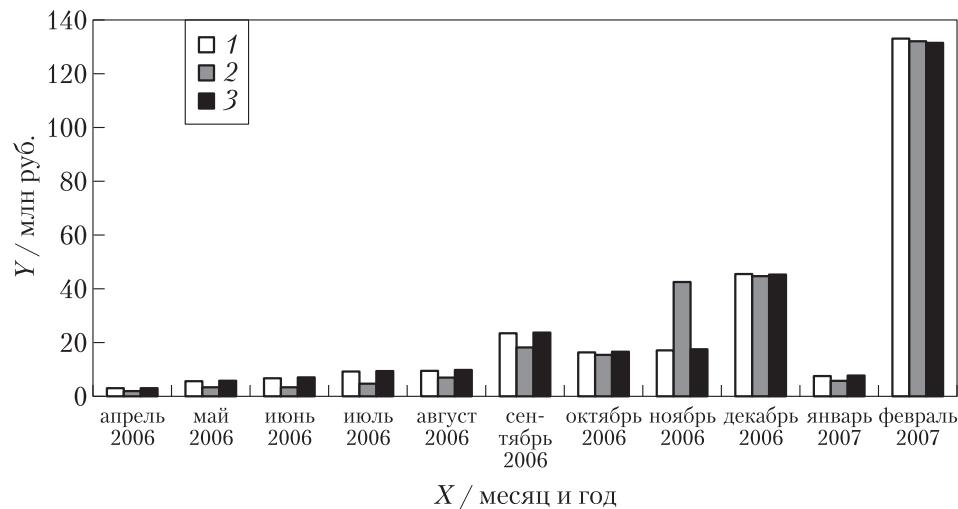


Рис. 4 Результаты решения задачи ОПП: 1 — с координацией; 2 — без координации; 3 — фактическое

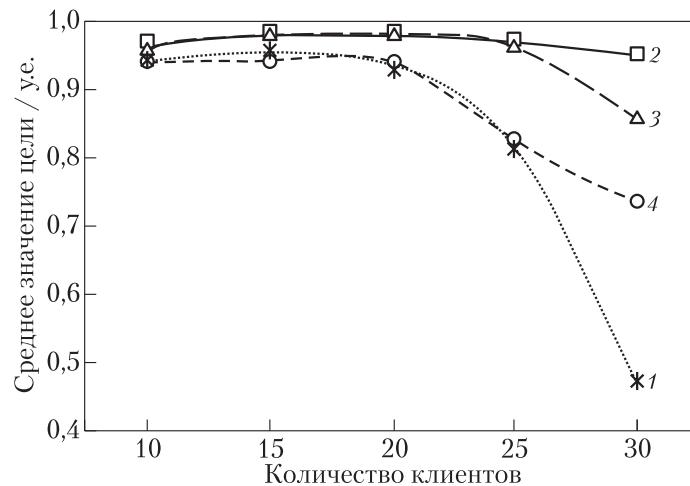


Рис. 5 Среднее значение сводного критерия качества маршрута: 1 — конкуренция; 2 — нейтралитет; 3 — сотрудничество; 4 — без взаимодействия

пяти задач и каждой архитектуры ГиИМАС проведено по 100 вычислительных экспериментов. По всем задачам и архитектурам ГиИМАС, а также для архитектуры без взаимодействия построена графическая зависимость среднего значения сводного критерия качества маршрута (рис. 5) от числа клиентов. Согласно рис. 5, качество принимаемых решений ГиИМАС с нейтральными агентами выше, чем ГиИМАС других архитектур. Однако чем ниже размерность задачи, тем меньше влияние согласованности на качество решения.

По итогам практического использования программного продукта, реализующего ГиИМАС, на двух объектах средняя суммарная себестоимость доставки грузов в день сократилась на 7,2%, средняя суммарная длительность доставки в день — на 12,13%, среднее время построения маршрутов в день — на 23,14%.

5 Заключение

Многолетний научный опыт, накопленный человеческим обществом, со все большей убедительностью показывает, что исследования естественных гетерогенных систем с присущими им разнообразием, дополнительностью, сотрудничеством и относительностью позволяют получать ценные знания о космосе, природе, мироздании, человеке и его роли. Особенно интересны междисциплинарные исследования с целью разработки искусственных гетерогенных систем с полезными для человека свойствами. Во-первых, это согласуется с новой картиной мира, к которой общество постепенно эволюционирует. Во-вторых, это создает качественный фундамент будущих инноваций. Информатика и ИИ накопили опыт реализации проектов компьютерных СППР, консультации которых позволяют человеку решать более сложные задачи в естественных гетерогенных системах.

Литература

1. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки / Под ред. А. М. Яшина. — СПб.: СПбГТУ, 2001. 711 с.
2. Борисов А. Н., Вилюмс Э. Р., Сукур А. Я. Диалоговые системы поддержки принятия решений на базе мини-ЭВМ: Информационное, математическое и программное обеспечение. — Рига: Зинате, 1986. 195 с.
3. Гаазе-Раппопорт М. Г., Постолов Д. А. От амебы до робота: модели поведения. — М.: Наука, 1987. 286 с.
4. Goonatilake S., Khebbal S. Intelligent hybrid systems // 1st Singapore Conference (International) on Intelligent Systems Proceedings. — Singapore, 1992. P. 356–364.
5. Medsker L. R. Hybrid intelligent systems. — Boston: Kluwer Academic Publ., 1995. 298 p.
6. Рыбина Г. В. Автоматизированное построение баз знаний для интегрированных экспертных систем // Изв. РАН. Теория и системы управления, 1998. № 5. С. 152–166.

7. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
8. Гаврилов А. В. Гибридные интеллектуальные системы. — Новосибирск: НГТУ, 2003. 168 с.
9. Ярушкина Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. — М.: Финансы и статистика, 2004. 320 с.
10. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / Под ред. Н. Г. Ярушкиной. — М.: Физматлит, 2007. 207 с.
11. Колесников А. В., Кириков И. А. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. — М.: ИПИ РАН, 2007. 387 с.
12. Колесников А. В. Кириков И. А., Листопад С. В., Румовская С. Б., Доманицкий А. А. Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / Под ред. А. В. Колесникова. — М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с.
13. Клачек П. М., Корягин С. И., Колесников А. В., Минкоева Е. С. Гибридные адаптивные интеллектуальные системы. Ч. 1: Теория и технология разработки. — Калининград: БФУ им. И. Канта, 2011. 374 с.
14. Witsenhausen H. S. A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems // IEEE Trans. Automatic Control, 1966. Vol. 11. No. 2. P. 161–167.
15. Колесников А. В., Солдатов С. А. Моделирование коллективного интеллекта, решающего сложную задачу планирования на машиностроительном предприятии // В мире научных открытий. Сер. Математика. Механика. Информатика, 2011. № 12. С. 172–181.

Поступила в редакцию 18.02.15

HETEROGENEOUS INTELLIGENT COMPUTER DECISION SUPPORT SYSTEMS: MODELS OF COORDINATION AND CONSISTENCY

I. Kirikov¹, A. Kolesnikov¹, S. Listopad¹, and S. Soldatov²

¹Kaliningrad Branch of Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation

²Lighton, 73-1 Bakuninskaya Str., Moscow 105082, Russian Federation

Abstract: The approach to the modeling of collective decision-making using computer decision support systems within the synergetic paradigm of artificial intelligence is considered. History of artificial intelligence has shown that the methods, constructed within the paradigm of computer modeling of the processes and phenomena in a single man's memory, are not relevant to the complexity of the real world problems. Such problems have substantial heterogeneity, which requires heterogeneous methods for their solution, like decision support system widely used to solve them. In this regard, the models of the hybrid

intelligent systems taking into account coordination and consistency are proposed as simulators of the real decision support systems. The results of computational experiments with the hybrid intelligent systems implementing the coordination and coherence effects are presented, demonstrating positive impact of the effects on the quality of collective decision-making.

Keywords: heterogeneity; decision support system; hybrid intelligent system; coordination; consistency

DOI: 10.14357/08696527150206

References

1. Kolesnikov, A. V. 2001. *Gibridnye intellektual'nye sistemy. Teoriya i tekhnologiya razrabotki* [Hybrid intelligent systems: Theory and technology of development]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGTU. 711 p.
2. Borisov, A. N., E. R. Vilyums, and A. Ya. Sukur. 1986. *Dialogovye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy na baze mini-EVM: Informatsionnoe, matematicheskoe i programmnoe obespechenie* [Interactive decision support system for minicomputers: Dataware, mathware and software]. Riga: Zinatne. 195 p.
3. Gaaze-Rapoport, M. G., and D. A. Pospelov. 1987. *Ot ameby do robota: Modeli povedeniya* [From the amoeba to the robot: Patterns of behavior]. Moscow: Nauka. 286 p.
4. Goonatilake, S., and S. Khebbal. 1992. Intelligent hybrid systems. *1st Singapore Conference (International) on Intelligent Systems Proceedings*. Singapore. 356–364.
5. Medsker, L. R. 1995. *Hybrid intelligent systems*. Boston: Kluwer Academic Publ. 298 p.
6. Rybina, G. V. 1998. Avtomatizirovannoe postroenie baz znaniy dlya integrirovannykh ekspertnykh sistem [Automated construction of the knowledge bases of the integrated expert systems]. *Izvestiya RAN, Teoriya i Sistemy Upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences, Theory and Control Systems] 5:152–166.
7. Tarasov, V. B. 2002. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: Filosofiya, psichologiya, informatika* [From multiagent systems to intelligent organizations: Philosophy, psychology, computer science]. Moscow: Editorial URSS. 352 p.
8. Gavrilov, A. V. 2003. *Gibridnye intellektual'nye sistemy* [Hybrid intelligent systems]. Novosibirsk: NGTU. 168 p.
9. Yarushkina, N. G. 2004. *Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh sistem* [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems]. Moscow: Finansy i statistika. 320 p.
10. Yarushkina, N. G., ed. 2007. *Nechetkie gibridnye sistemy. Teoriya i praktika* [Fuzzy hybrid systems. Theory and practice]. Moscow: Fizmatlit. 207 p.
11. Kolesnikov, A. V., and I. A. Kirikov. 2007. *Metodologiya i tekhnologiya resheniya slozhnykh zadach metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh system* [Methodology and technology of the complex problems solved by the methods of the functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 387 p.
12. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and A. A. Domanitskiy. 2011. *Reshenie slozhnykh zadach kommivoyazhera metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh system* [Complex travelling salesman problems solved by the methods of the functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 295 p.

13. Klacheck, P. M., S. I. Koryagin, A. V. Kolesnikov, and E. S. Minkoeva. 2011. *Gibridnye adaptivnye intellektual'nye sistemy. Ch. 1: Teoriya i tekhnologiya razrabotki* [Hybrid adaptive intelligent systems. Part 1: Theory and technology of development]. Kaliningrad: BFU im. I. Kanta. 374 p.
14. Witsenhausen, H. S. 1966. A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems. *IEEE Trans. Automatic Control* 11(2):161–167.
15. Kolesnikov, A. V., and S. A. Soldatov. 2011. Modelirovaniye kollektivnogo intellekta, reshayushchego slozhnuyu zadachu planirovaniya na mashinostroitel'nom predpriyatiyi [Simulation of the collective intelligence solving complex planning problem of the machinery manufacture]. *V mire nauchnykh otkrytiy. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika* [In the World of Scientific Discoveries. Mathematics. Mechanics. Computer science ser.] 12:172–181.

Received February 18, 2015

Contributors

Kirikov Igor A. (b. 1955) — Candidate of Science (PhD) in technology; director, Kaliningrad Branch of 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. (1948) — Doctor of Science in technology; professor, Department of Telecommunications, Immanuel Kant Russian State University; senior scientist, Kaliningrad Branch of Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; avkolesnikov@yandex.ru

Listopad Sergey V. (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in technology; scientist, Kaliningrad Branch of Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; ser-list-post@yandex.ru

Soldatov Sergey A. (b. 1982) — Candidate of Science (PhD) in technology; Chief Engineer, “Lighton” Ltd., 73-1 Bakuninskaya Str., Moscow 105082, Russian Federation; soldatov@l-on.ru

ИНТЕРНЕТ-СЕРВИС ПЛАНИРОВАНИЯ РАСХОДОВ

A. V. Ильин¹

Аннотация: Статья представляет инновационный интернет-сервис, в котором реализован метод планирования расходов с учетом приоритетов расходных статей. Наиболее широкая область применения метода — планирование бюджета, хотя сервис позволяет гибко и эффективно планировать расходы любого ресурса. Важное прикладное значение имеет возможность задавать ожидаемое количество ресурса и запросы по расходным статьям в числовых отрезках и получать в отрезках результаты, а затем уточнять план по ходу его выполнения. Статья может быть полезна экспертам по распределению корпоративных и государственных ресурсов; преподавателям, аспирантам и студентам вузов; производителям программного обеспечения.

Ключевые слова: планирование расходов; планирование бюджета; распределение ресурса; интернет-сервис; SaaS

DOI: 10.14357/08696527150207

1 Введение

Интернет-сервис «Планирование расходов» входит в состав комплекса программного обеспечения экспертного планирования ресурсов, разрабатываемого в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук в рамках работ по информатизации экономического механизма [1–3].

Для большинства организаций и многих физических лиц доход является переменной величиной. Он может зависеть от объемов продаж, рыночных цен, курсов валют и множества других факторов. Однако в настоящее время даже на федеральном уровне расходная часть бюджета планируется на основе точечных предположений об общем объеме доходов. Проблема традиционного подхода [4] в том, что если эти предположения оказываются ошибочными, то бюджет приходится «перекраивать». Результаты планирования также представляются точечными значениями по каждой расходной статье, хотя на практике большинство расходов нельзя предсказать точно (рис. 1).

Для устранения этих недостатков проф. В. Д. Ильиным была предложена идея интервальных алгоритмов планирования расходов [5]. Задачи *бесприоритетного* и *приоритетного* планирования расходов имеют неформальные поста-

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

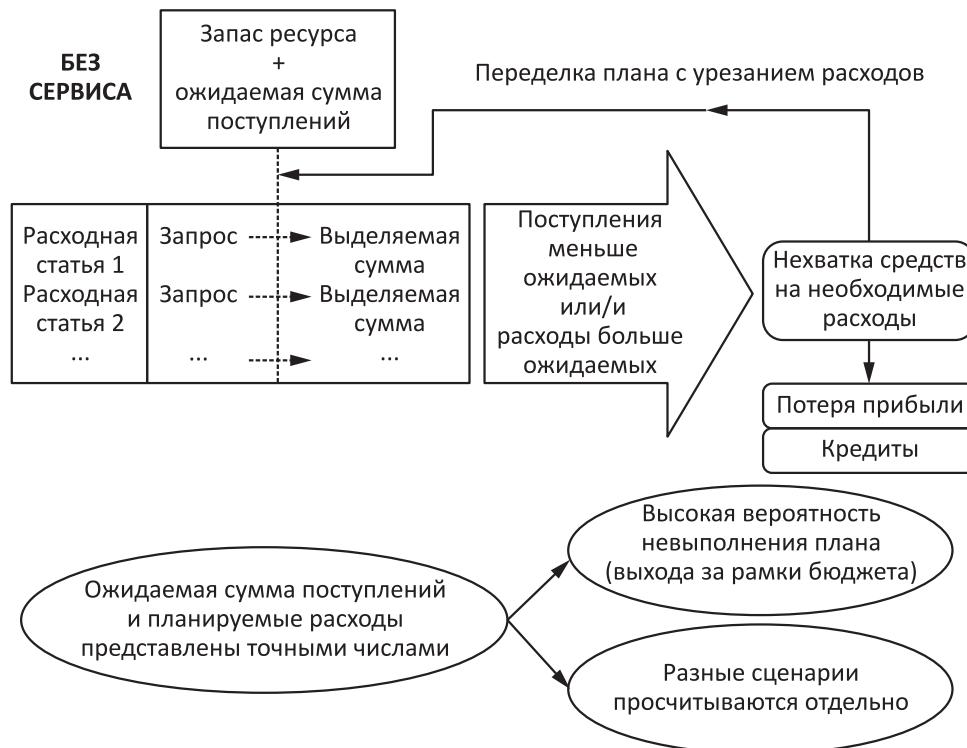
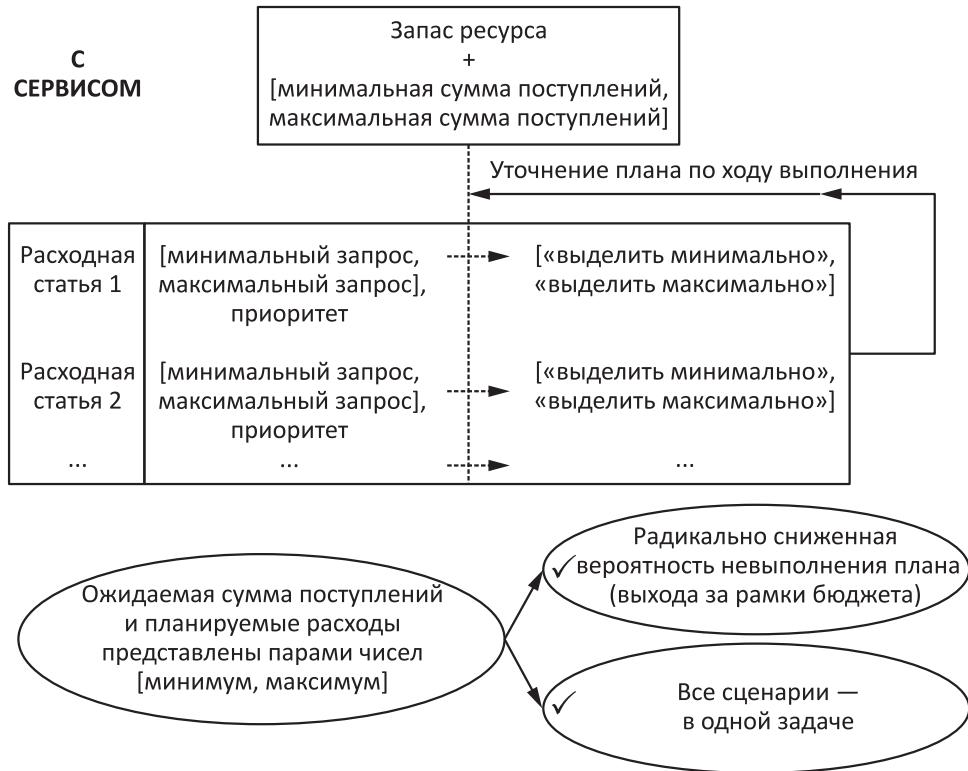


Рис. 1 Традиционный подход и его проблемы

новки, содержащие *обязательные и ориентирующие правила*. К обязательным правилам относятся ограничения на расход ресурса, так как они гарантируют реализуемость решения, а также правила неизбыточности удовлетворения запросов на ресурс. Ориентирующие правила определяют направление поиска решения. Решение, найденное с помощью предлагаемых в разд. 3 алгоритмов, всегда удовлетворяет обязательным правилам, а ориентирующими правилам удовлетворяет в той мере, в которой это позволяет интервальная специфика задачи. Если выполнение ориентирующих правил возможно, то решение, соответствующее им, считается более эффективным, чем несоответствующее.

Постановка задачи и алгоритм приоритетного планирования, описанные в [5, 6], при равных приоритетах расходных статей не приводили задачу к бесприоритетной. Предлагаемый в параграфе 3.2 унифицированный метод планирования расходов устраняет этот недостаток. Метод реализован в действующем интернет-сервисе (www.res-plan.ru), не имеющем известных аналогов. Сервис предлагает удобное средство распределения ожидаемого количества ресурса по

**Рис. 2** Реализованный подход

расходным статьям, радикально увеличивающее гибкость и эффективность планирования (рис. 2).

2 Интернет-сервис и его клиентские приложения

2.1 Принципы работы интернет-сервисов

Авторская концепция интернет-сервисов схожа с концепцией «Программное обеспечение как услуга», известной как SaaS (англ. Software as a Service [7, 8]). Различие в том, что данные пользовательских задач не хранятся на сервере, а вместо веб-приложений предлагаются специальные клиентские приложения для Microsoft Windows®, Apple Mac OS X® и других операционных систем. Последнее объясняется тем, что стабильность и производительность веб-приложений зависит от браузеров, в которых они работают.

Основные принципы следующие:

- алгоритмы вычислений реализованы в серверных приложениях (сервисах), которые работают на надежных и высокопроизводительных серверах 24 ч в сутки 7 дней в неделю;
- пользователь скачивает с сайта www.res-plan.ru соответствующую его операционной системе программу установки клиентского приложения сервиса и запускает ее. Процесс установки предельно прост и не требует специальных знаний;
- клиентское приложение предоставляет привычный графический интерфейс ввода данных и манипуляций с ними. Только когда необходимо произвести расчеты, клиентское приложение по команде пользователя соединяется через Интернет с сервисом и отсылает ему запрос по TCP (transmission control protocol) в специальном текстовом формате. В запрос включаются только необходимые для расчетов числа — без всяких смысловых привязок, т. е. через Интернет не передаются конфиденциальные данные, такие как названия ресурсов, расходных статей, единиц измерения ресурсов и т. д. Заголовок запроса состоит из закодированных данных о типе запроса и рабочем месте пользователя: при первом запуске клиентского приложения проходит процесс регистрации рабочего места на сервере (рабочему месту присваивается уникальный идентификатор);
- сервис, получив и «разобрав» запрос, производит вычисления и отсылает клиентскому приложению результаты расчетов — также в специальном текстовом формате, «известном» клиентскому приложению. Никакие пересылаемые данные не сохраняются на сервере: это привело бы только к ненужному использованию дискового пространства. Все данные хранятся только на стороне пользователя. Сервис обрабатывает полученный запрос в оперативной памяти, отсылает в ответ результаты и разрывает соединение с клиентским приложением. Единственное, что хранится на сервере, — это база данных о зарегистрированных рабочих местах пользователей. Она нужна для авторизации запросов по их заголовкам.

2.2 Преимущества интернет-сервисов

Использование интернет-сервисов дает следующие преимущества:

- программные системы планирования ресурсов, реализованные в виде автономных приложений, как правило, достаточно дороги. Использование сервиса значительно дешевле и оплачивается пользователем только на те периоды времени, в которые сервис будет реально использоваться. Техническая поддержка и получение новых версий клиентского приложения включены в стоимость сервиса. Пользователю нужно только пройти простой процесс установки клиентского приложения на своем рабочем месте и его регистрации

в сервисе. Забота о программном и аппаратном обеспечении самого сервиса лежит на его разработчиках (автономные приложения для планирования ресурсов зачастую требуют профессиональной настройки, обычно платной);

- сервисы могут по договоренности использоваться сторонними разработчиками: для этого предлагаются специальные интерфейсы программирования приложений (API — application programming interface), позволяющие взаимодействовать с сервисами;
- вычислительные алгоритмы реализованы только на сервере, что позволяет исключить их несанкционированное использование.

2.3 Работа с клиентским приложением

1. Пользователь задает минимальное количество ресурса как сумму запаса и поступлений при наихудшем сценарии и максимальное количество ресурса — как сумму запаса и поступлений при оптимальном «раскладе».
2. Задается таблица расходных статей, для каждой из которых можно ввести наименьший и наибольший предполагаемый расход (или точное значение) — запросы на ресурс по расходным статьям.
3. Пользователь может задать весовые коэффициенты (приоритеты) расходных статей и использовать их в расчетах. Некоторые запросы можно пометить как обязательные (например, выплата по кредиту или арендная плата редко могут быть уменьшены).
4. Пользователь дает клиентскому приложению команду ‘Распределить’, оно связывается через Интернет с сервисом, отсылает ему запрос на вычисления и, получив ответ, предоставляет полученные результаты. Для каждой расходной статьи это значения ‘Выделить мин.’ и ‘Выделить макс.’ — план для наихудшего и наилучшего сценариев. Дополнительно показываются значения ‘Выделить средн.’, чтобы было видно примерное распределение ресурса, а также диаграммы среднего распределения. Сумма значений ‘Выделить мин.’ соответствует заданному минимуму ресурса, а сумма ‘Выделить макс.’ — максимуму. Значения ‘Выделить’ рассчитываются сервисом на основании заданных запросов на ресурс и (опционально) приоритетов расходных статей.
5. По ходу выполнения плана, получив часть поступлений, произведя некоторые расходы или получив уточнения по предстоящим поступлениям или расходам, пользователь вводит в приложении соответствующие данные, снова дает команду ‘Распределить’ и получает уточненные результаты. Если количество ресурса задано точно (минимальное равно максимальному), то полученные значения ‘Выделить макс.’ можно считать точным решением задачи планирования.

2.4 Гибкость и эффективность

Вероятность выхода за рамки бюджета радикально уменьшается за счет того, что пользователь заранее видит границы, в которых нужно удерживать затраты по расходным статьям, и сужает их по ходу выполнения плана.

Можно смоделировать любой реальный расход: задать минимальный запрос равным максимальному, пометить его как обязательный, дать команду ‘Распределить’ и увидеть, как изменятся границы затрат по остальным расходным статьям.

Могут быть заданы любые названия и единицы измерения ресурса (руб., тыс. руб.; тонны и т. д.), а также *прикладная точность* планирования. Прикладная точность — это минимальное значимое количество ресурса от 0,0001 до 1 млрд. Все данные будут округляться до этого числа. Результаты расчетов округляются сервисом по специальному алгоритму — с сохранением нужной суммы, учетом запросов и приоритетов. Это позволяет, в частности, решать целочисленные задачи.

Для каждой расходной статьи может быть задана таблица детализации. Количество ресурса, выделяемое расходной статье, распределяется по расходным статьям, составляющим ее детализацию. Число уровней детализации не ограничено: таким образом, может быть задана *иерархическая система потребления ресурса*. Для каждой таблицы расходных статей можно установить свой признак ‘Использовать вес. коэф-ты’ и свою прикладную точность. Команда ‘Распределить’ может быть дана как для всей системы в целом, так и для ее части.

Помимо использования весовых коэффициентов (приоритетов) расходных статей, можно временно исключать любые статьи из рассмотрения (например, если результаты планирования слишком «поджимают»). Чтобы временно исключить статью, нужно просто поставить «галочку» в соответствующей клетке таблицы. Также можно самостоятельно корректировать полученные результаты расчетов. Приложение уведомит, если введенные данные будут некорректны.

Вместе с клиентским приложением поставляются примеры задач планирования расходов для государственного, корпоративного и семейного бюджета.

Клиентское приложение предоставляет привычный интерфейс работы с таблицами расходных статей. Результаты расчетов, ошибочные и нелогичные данные выделяются цветом (зеленый, красный, синий).

В качестве расходных статей можно задавать календарные периоды, для чего предусмотрен удобный интерфейс.

Каждая задача планирования сохраняется в отдельном файле, что позволяет копировать ее с одного рабочего места на другое. В одной задаче можно отдельно планировать расходы нескольких ресурсов.

Можно копировать данные между различными таблицами задач планирования расходов и листами Microsoft Excel, OpenOffice Calc, LibreOffice Calc и др.

Специальные операции импорта/экспорта данных предусмотрены для файлов формата MS Excel (XLS, XLSX).

3 Интервальный метод планирования расходов

3.1 Задача без приоритетов

Для числового отрезка $[a, A]$ ($a \geq 0, A > 0$), задающего ожидаемое количество ресурса, и отрезков $[b_i, B_i]$ ($b_i \geq 0, B_i > 0, i = 1, \dots, n$), задающих запросы по расходным статьям, требуется найти отрезки $[x_i, X_i]$ ($b_i \geq x_i \geq 0, B_i \geq X_i \geq 0, i = 1, \dots, n$; $\sum_{i=1}^n x_i \leq a, \sum_{i=1}^n X_i \leq A$), представляющие план расходов. В зависимости от наличия дефицита ресурса по суммам левых и правых границ запросов имеет место один из четырех случаев:

$$(1) \sum_{i=1}^n b_i > a, \sum_{i=1}^n B_i > A.$$

В этом случае сначала решается *задача для левых границ*, а затем *задача для правых границ*;

$$(2) \sum_{i=1}^n b_i \leq a, \sum_{i=1}^n B_i > A.$$

В этом случае полагаем $x_i = b_i$ ($i = 1, \dots, n$), затем решаем *задачу для правых границ*;

$$(3) \sum_{i=1}^n b_i > a, \sum_{i=1}^n B_i \leq A.$$

В этом случае полагаем $X_i = B_i$ ($i = 1, \dots, n$), затем решаем *задачу для левых границ*;

$$(4) \sum_{i=1}^n b_i \leq a, \sum_{i=1}^n B_i \leq A.$$

В этом случае $x_i = b_i, X_i = B_i$ ($i = 1, \dots, n$) и задача считается вырожденной.

Задача для левых границ элементарна. Для нулевых левых границ запросов ($b_i = 0$) $x_i = 0$. Обозначим через I множество индексов i , для которых $b_i > 0$. Обязательные правила планирования:

$$\frac{x_i}{b_i} = \frac{x_j}{b_j} \quad (\forall i, j \in I), \quad \sum_{i \in I} x_i = a.$$

Решение:

$$x_j = \frac{b_j}{\sum_{i \in I} b_i} a \quad (\forall j \in I).$$

Задача для правых границ зачастую кажется столь же элементарной и решаемой формулами:

$$X_j = \frac{B_j}{\sum_{i=1}^n B_i} A \quad (j = 1, \dots, n).$$

Приведем простой контрпример. Пусть для распределяемого ресурса задан отрезок $[3, 4]$ и имеются запросы по двум расходным статьям: $[1, 5]$ и $[4, 5]$. Тогда

$$x_1 = \frac{1}{1+4} \cdot 3 = 0,6; \quad x_2 = \frac{4}{1+4} \cdot 3 = 2,4.$$

Применение

$$X_j = \frac{B_i}{\sum_{i=1}^n B_i} A \quad (j = 1, \dots, n)$$

дает

$$X_1 = X_2 = \frac{5}{5+5} \cdot 4 = 2,$$

т. е. получается $X_2 < x_2$ (абсурд).

На самом деле задача для правых границ решается итеративно. Обязательным является правило распределения ресурса $\sum_{i=1}^n X_i = A$. Если обозначить через I множество индексов i , для которых $B_i > b_i$, и через K множество индексов i , для которых $B_i = b_i$ ($I = \{1, \dots, n\} \setminus K$), то ориентирующими правилами распределения являются

$$\begin{aligned} \frac{X_i - x_i}{X_j - x_j} &= \frac{B_i - b_i}{B_j - b_j} \quad \forall i, j \in I; \\ \frac{X_i}{X_j} &= \frac{B_i}{B_j} \quad \forall i, j \in K. \end{aligned}$$

3.2 Унифицированная задача с учетом приоритетов

Для числового отрезка $[a, A]$ ($a \geq 0, A > 0$), задающего величину распределяемого ресурса, отрезков $[b_i, B_i]$ ($b_i \geq 0, B_i > 0, i = 1, \dots, n$), задающих запросы по расходным статьям, и весовых коэффициентов (приоритетов) расходных статей $c_i > 0$ ($i = 1, \dots, n$) требуется найти отрезки $[x_i, X_i]$ ($b_i \geq x_i \geq 0, B_i \geq X_i \geq 0, i = 1, \dots, n; \sum_{i=1}^n x_i \leq a, \sum_{i=1}^n X_i \leq A$), представляющие план

расходов. Так же как и в задаче без приоритетов, в зависимости от наличия дефицита ресурса по суммам левых и правых границ запросов имеет место один из случаев (1)–(4), в соответствии с чем требуют или не требуют решения задачи для левых и правых границ.

Задача для левых границ

Для $b_i = 0$ полагаем $x_i = 0$. Далее задача решается итеративно.

Обязательным правилом распределения является равенство $\sum_{i=1}^n x_i = a$.

Введем множество I индексов еще не найденных x_i : $I = \{i | b_i > 0, 1 \leq i \leq n\}$. Ориентирующее правило:

$$\frac{x_i}{x_j} = \frac{b_i}{b_j} \frac{c_i}{c_j} \quad \forall i, j \in I.$$

Введем переменную $\Delta a := a$ (здесь и далее $:=$ — оператор присваивания).

В каждой итерации для еще не найденных левых границ полагаем

$$x_j := \frac{b_j c_j}{\sum_{i \in I} b_i c_i} \Delta a \quad (j \in I).$$

Затем полагаем вспомогательное множество I' равным $\{i \in I | x_i \geq b_i\}$. Для всех $i \in I'$ x_i считается найденным и равным b_i . Если же I' пусто, полагаем $I' := I$. Далее изменяем I и Δa :

$$I := I \setminus I', \quad \Delta a := \Delta a - \sum_{i \in I'} x_i.$$

Если теперь I пусто, итерации прекращаются.

Задача для правых границ

Обязательным является правило $\sum_{i=1}^n X_i = A$. Если обозначить через I множество индексов i , для которых $B_i > b_i$, и через K множество индексов i , для которых $B_i = b_i$ ($I = \{1, \dots, n\} \setminus K$), то ориентирующими правилами распределения будут

$$\begin{aligned} \frac{X_i - x_i}{X_j - x_j} &= \frac{(B_i - b_i)c_i}{(B_j - b_j)c_j} \quad \forall i, j \in I; \\ \frac{X_i}{X_j} &= \frac{B_i c_i}{B_j c_j} \quad \forall i, j \in K. \end{aligned}$$

Если все приоритеты расходных статей равны некоторой константе c , нетрудно видеть, что задача идентична задаче без приоритетов.

Введем переменную $\Delta A := A - (x_1 + \dots + x_n)$.

На каждой итерации для всех $j \in I$ полагаем

$$X_i := x_j + \frac{(B_j - b_j)c_j}{\sum_{i \in I} (B_i - b_i)c_i} \Delta A.$$

Теперь полагаем вспомогательное множество I' равным $\{i \in I | X_i \geq B_i\}$. Для всех $i \in I'$ X_i считается найденным и равным B_i . Если же I' пусто, полагаем $I' := I$. Далее изменяем ΔA и I следующим образом:

$$\Delta A := \Delta A - \sum_{i \in I'} (X_i - x_i), \quad I := I \setminus I'.$$

Теперь если I пусто, итерации прекращаются.

После окончания итераций может оказаться, что $\Delta A > 0$ (т. е. не весь ресурс распределен). Это может произойти, только если для всех i , для которых $B_i > b_i$, в процессе итераций получилось $X_i = B_i$ (в противном случае итерации были бы продолжены и остаток ΔA пошел бы на увеличение тех X_i , которые меньше B_i). В таком случае ΔA итеративно распределяется между теми расходными статьями, у которых $B_i = b_i$. На каждой итерации для $j \in K$ полагаем

$$X_j = x_j + \frac{B_j c_j}{\sum_{i \in K} B_i c_i} \Delta A.$$

Теперь полагаем $K' := \{i \in K | X_i \geq B_i\}$. Для всех $I \in K'$ X_i считается найденным и равным B_i . Если же K' пусто, полагаем $K' := K$. Далее следующим образом изменяем ΔA и K :

$$\Delta A := \Delta A - \sum_{i \in K'} (X_i - x_i), \quad K := K \setminus K'.$$

Теперь если K пусто, итерации прекращаются.

4 Заключение

Круг пользователей, которым может быть полезен интернет-сервис «Планирование расходов», — от частных пользователей и предпринимателей, занимающихся планированием своего бюджета, до экспертов по распределению

корпоративных и государственных ресурсов. Производителям программного обеспечения предлагается использование сервиса в собственных приложениях.

Эффективное планирование расходов особенно актуально в кризисные периоды, когда рыночные цены и курсы валют колеблются не только в силу экономических факторов.

Литература

1. Ильин В. Д. S-модель нормализованной экономической системы. — М.: ИПИ РАН, 2010. 103 с. <https://smodeling.files.wordpress.com/2010/03/vd-ilyin-s-model-nec-sys-2010e.pdf>.
2. Ильин А. В., Ильин В. Д. S-экономика: механизм хозяйствования в эпоху Интернета. — М.: ИПИ РАН, 2011. 105 с. https://smodeling.files.wordpress.com/2012/02/s-economics-2011_f-rus.pdf.
3. Ilyin A. V., Ilyin V. D. Informatization of normalized economic mechanism: E-services for resource planning // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 4. С. 242–256.
4. Total Cost Management Framework. AACE[®] International, 2012. 319 с. <http://www.aacei.org/resources/tcm>.
5. Ильин В. Д., Гавриленко Ю. В., Ильин А. В., Макаров Е. М. Математические средства ситуационной информатизации. — М.: Наука, 1996. 88 с.
6. Ильин А. В. Экспертное планирование ресурсов. — М.: ИПИ РАН, 2013. 58 с. <https://smodeling.files.wordpress.com/2014/05/av-ilyin-epr-2013.pdf>.
7. Five benefits of Software as a Service. — Trumba Corporation, 2007. 8 p. http://www.trumba.com/connect/knowledgecenter/pdf/SaaS_paper_WP-001.pdf.
8. Jamsa K. A. Cloud computing. — Burlington: Jones & Bartlett Learning, 2013. 322 p.

Поступила в редакцию 10.04.15

THE ONLINE SERVICE FOR COST PLANNING

A. V. Ilyin

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

Abstract: The article presents the innovative online service that implements the method of cost planning taking into account the priorities of expense items. The widest area of the service usage is budgeting, although the service allows to plan allocation of any resource flexibly and efficiently. Client applications of the service provide the possibility to specify an expected resource amount and requests for expense items as numerical intervals. The planning results are also represented by numeric intervals, and the plan is adjusted in the course of its

implementation. This approach has a great practical importance. The article can be useful for experts on the distribution of corporate and government resources, teachers, graduate students, software developers, and vendors.

Keywords: cost planning; budget planning; resource allocation; online service; SaaS

DOI: 10.14357/08696527150207

References

1. Ilyin, V. D. 2010. *S-model' normalizovannoy ekonomiceskoy sistemy* [S-model of the normalized economic system]. Moscow: Institute of Informatics Problems of RAS. 103 p. Available at: <https://smodeling.files.wordpress.com/2010/03/vd-ilyin-s-model-nec-sys-2010e.pdf> (accessed April 10, 2015).
2. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2011. *S-ekonomika: Mekhanizm khozyaystvovaniya v epokhu interneta* [S-economics: Mechanism of management in the Internet epoch]. Moscow: Institute of Informatics Problems of RAS. 105 p. Available at: https://smodeling.files.wordpress.com/2012/02/s-economics-2011_f-rus.pdf (accessed April 10, 2015).
3. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2014. Informatization of normalized economic mechanism: e-services for resource planning. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(4):242–256.
4. AACE[®] International. 2012. Total Cost Management Framework. 319 p.
5. Ilyin, V. D., Yu. V. Gavrilenco, A. V. Ilyin, and E. M. Makarov. 1996. *Matematicheskie sredstva situatsionnoy informatizatsii* [Mathematical tools for situational informatization]. Moscow: Nauka. 88 p.
6. Ilyin, A. V. 2013. *Ekspertnoe planirovanie resursov* [Expert Resource Planning]. Moscow: Institute of Informatics Problems of RAS. 58 p. Available at: <https://smodeling.files.wordpress.com/2014/05/av-ilyin-epr-2013.pdf> (accessed April 10, 2015).
7. Trumba Corporation. 2007. Five benefits of Software as a Service. 8 p. Available at: http://www.trumba.com/connect/knowledgecenter/pdf/Saas_paper_WP-001.pdf (accessed April 10, 2015).
8. Jamsa, K. A. 2013. *Cloud computing*. Burlington: Jones & Bartlett Learning. 322 p.

Received April 10, 2015

Contributor

Ilyin Alexander V. (b. 1975) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; avilyin@ipiran.ru

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К АВТОМАТИЗАЦИИ ОЦЕНИВАНИЯ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ

A. B. Босов¹, E. C. Гресс², A. B. Наумов³

Аннотация: Рассматриваются вопросы автоматизации анализа качества образования в вузах. Предложен оригинальный алгоритм подсчета рейтинга студентов. Проведен статистический анализ сессионной составляющей рейтинга (полученных отметок). Приведены результаты анализа рейтинга студентов на основе обработки реальных данных. Предложены способы использования полученного рейтинга, в частности для поощрения (отчисления) студентов и проверки качества контрольных мероприятий.

Ключевые слова: рейтинговая система; качество образования; успеваемость студентов; статистические критерии; информационная система

DOI: 10.14357/08696527150208

1 Введение

В зарубежных научно-образовательных центрах и университетах формализацией и исследованием вопросов объективного оценивания знаний и навыков обучающихся занимаются достаточно давно [1]. Накопленный в Европе и США опыт реализуется как в системах дистанционного обучения [2, 3], так и в многочисленных методиках оценивания очного образовательного процесса, научно-исследовательской или творческой деятельности студенчества [4, 5]. Характерной общей чертой этих исследований является высокий уровень доверия компьютерным средствам оценивания и активное привлечение самых современных информационных технологий к реализации доступных, информативных и содержательных ресурсов, ориентированных на удаленный доступ из сети Интернет.

Практика централизованного административного управления образовательным процессом, сложившаяся в нашей стране, директивность в вопросах разработки стандартов, планов и учебных программ — те условия, что вызывают обоснованный скепсис со стороны профессорско-преподавательского состава в отношении попыток формализации показателей образовательного процесса,

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

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), gress@mail.ru

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), naumovav@mail.ru

в частности создания универсальной рейтинговой модели оценивания успеваемости студентов.

Несмотря на это, эксперименты с внедрением рейтинга в учебный процесс проводятся. Их цель — с одной стороны, изучить применимость подходов зарубежных коллег, с другой — создать собственные представления о формировании рейтинговых показателей и алгоритмов их применения, позволяющих в недалеком будущем осуществить постепенный переход на расширенную шкалу оценивания (100-балльную) и внедрить рейтинговую парадигму в практику [6]. Такие эксперименты особенно важны на фоне повышенного внимания к вопросам оценки качества образования [7] и создания инфотелекоммуникационной инфраструктуры вуза [8]. В таких системах данные об успеваемости студента можно использовать как обратную связь по усвоению изучаемых дисциплин, а рейтинг студентов — как интегральную оценку их достижений на всем протяжении обучения в вузе. При этом рейтинг, будучи наиболее удобной формой интегрального оценивания знаний, должен объединять в себе большое число факторов, отображающих как учебный процесс, так и личностные характеристики студента [9, 10].

2 Методика расчета рейтинга студентов

Для формирования методики расчета рейтингов естественно использовать лучшие международные практики. Однако универсальность любой методологии оказывается сильно ограниченной внутренними особенностями отдельного вуза. По этой причине в основу выполненного исследования были положены не только сложившиеся общепринятые подходы в этой области, но и детальный анализ практики оценки качества обучения, сложившейся в конкретном вузе — Московском авиационном институте (МАИ). Как результат анализа и обобщения различных международных (ECTS — European Credit Transfer and Accumulation System [4] в странах EC, GPA — Grade Point Average [5, 11] в США) и российских рейтинговых систем (в МГУ [12], в Юго-Западном государственном университете [13]), подробный анализ которых проведен в [6], вопросов по формированию рейтинга для систем дистанционного обучения [14], а также внутренних положений МАИ, предлагается следующий алгоритм подсчета рейтинга студентов.

В общем случае рейтинг студента предлагается вычислять следующим образом:

$$r_l(t) = \sum_{i=1}^I w_i r_{li}(t), \quad (1)$$

где $l = 1, 2, \dots, L$ — номер студента; L — число студентов в вузе, обучающихся по одному учебному плану (без ограничения общности); t — момент времени, в который пользователь системы запрашивает рейтинг студента; $r_l(t)$ — рейтинг l -го студента в t -й момент времени; $i = 1, 2, \dots, I$ — номер семестра; I — число

семестров обучения l -го студента; w_i — вес i -го семестра (данная величина устанавливается методистами вуза и факультета, одинакова для всех студентов, учащихся по одному учебному плану, и остается постоянной на всем протяжении обучения студента в вузе, поэтому не зависит от конкретного студента l и момента времени t), $w_i \in [0; 1]$; $r_{li}(t)$ — рейтинг l -го студента в i -м семестре в t -й момент времени. Пример весов семестров для студентов-бакалавров с учетом большей значимости текущего семестра по сравнению с предыдущим приведен в табл. 1.

Если в t -й момент времени l -й студент еще не учился в i -м семестре, то $r_{li}(t) = 0$. Если в момент времени t студент уже закончил учиться в i -м семестре, то значение $r_{li}(t)$ соответствует рейтингу студента в i -м семестре на момент получения последней отметки, имеющей отношение к i -му семестру. Студенты могут сдавать задолженности за предыдущие семестры в последующих, тем самым повышая свой рейтинг за предыдущие семестры и итоговый рейтинг.

В выражении (1)

$$r_{li}(t) = \sum_{j=1}^J w_{ij} r_{lij}(t), \quad (2)$$

где $j = 1, 2, \dots, J$ — номер дисциплины; J — количество дисциплин в i -м семестре l -го студента; w_{ij} — вес в i -м семестре j -й дисциплины (данная величина устанавливается методистами факультета, одинакова для каждого студента, изучающего данную дисциплину, и остается постоянной на всем протяжении обучения студента в вузе, поэтому не зависит от конкретного студента l и момента времени t), $w_{ij} \in [0; 1]$; $r_{lij}(t)$ — рейтинг l -го студента в i -м семестре по j -й дисциплине в t -й момент времени. В табл. 2 приведен пример весов дисциплин в семестре для студентов, обучающихся по направлению «Прикладная математика и информатика».

Далее, в выражении (2)

$$r_{lij}(t) = w^c r_{lij}^c(t) + w^s r_{lij}^s(t) + w^p r_{lij}^p(t), \quad (3)$$

где w^c — вес модуля текущего контроля по дисциплине в семестре, $w^c \in [0; 1]$; w^s — вес сессионного модуля в семестре, $w^s \in [0; 1]$; w^p — вес модуля личностных характеристик студента по дисциплине (поведение, активность, ведение

Таблица 1 Веса семестров для бакалавров

| № семестра | Вес семестра |
|------------|--------------|
| 1 | 0,09 |
| 2 | 0,10 |
| 3 | 0,11 |
| 4 | 0,12 |
| 5 | 0,13 |
| 6 | 0,14 |
| 7 | 0,15 |
| 8 | 0,16 |

Таблица 2 Веса дисциплин в семестре

| Вес | Наименование дисциплины |
|------|-------------------------|
| 0,12 | Алгебра и геометрия |
| 0,16 | Архитектура компьютеров |
| 0,14 | Дискретная математика |
| 0,07 | Иностранный язык-1 |
| 0,20 | Математический анализ |
| 0,23 | Основы информатики |
| 0,03 | Физическая культура |
| 0,05 | Философия |

научной работы, выступления на конкурсах и олимпиадах по профессиональной тематике и т. п.), $w^p \in [0; 1]$; величины w^c , w^s и w^p одинаковы для каждого студента во всех семестрах для всех дисциплин, устанавливаются методистами вуза и остаются постоянными на всем протяжении обучения студента в вузе, поэтому не зависят от индексов l , i , j и момента времени t , $w^c + w^s + w^p = 1$ (на взгляд авторов, целесообразно использовать следующие значения весов: $w^c = 0,4$, $w^s = 0,5$, $w^p = 0,1$); $r_{lij}^c(t)$ — рейтинг l -го студента по текущему контролю в i -м семестре по j -й дисциплине в t -й момент времени; $r_{lij}^s(t)$ — сессионный рейтинг l -го студента в i -м семестре по j -й дисциплине в t -й момент времени; $r_{rij}^p(t)$ — рейтинг личностных характеристик l -го студента в i -м семестре по j -й дисциплине в t -й момент времени.

Рейтинг по текущему контролю $r_{lij}^c(t)$ из (3) определяется соотношением

$$r_{lij}^c(t) = \sum_{k=1}^K w_{ijk}^c m_{lijk}^c(t) w_{lijk}^c(t).$$

Здесь $k = 1, 2, \dots, K$ — номер контрольной точки в модуле текущего контроля; K — число контрольных точек по j -й дисциплине в модуле текущего контроля в i -м семестре l -го студента; w_{ijk}^c — вес k -й контрольной точки по j -й дисциплине в модуле текущего контроля в i -м семестре (данная величина устанавливается методистами факультета и кафедр, одинакова для каждого студента, изучающего данную дисциплину, и остается постоянной на всем протяжении обучения студента в вузе, поэтому не зависит от конкретного студента l и момента времени t), $w_{ijk}^c \in [0; 1]$; $m_{lijk}^c(t)$ — отметка l -го студента в модуле текущего контроля в i -м семестре по j -й дисциплине за k -ю контрольную точку в t -й момент времени, $m_{lijk}^c(t) \in [0; M]$, где M — максимальная отметка в используемой шкале оценивания; $w_{lijk}^c(t)$ — понижающий коэффициент отметки l -го студента, зависящий от числа попыток сдачи k -й контрольной точки по j -й дисциплине в модуле текущего контроля в i -м семестре в t -й момент времени. Для каждого вида контроля в модуле текущего контроля зависимость понижающего коэффициента от числа попыток сдачи определяется методистами вуза, факультета и кафедры и остается постоянной на всем протяжении обучения студента в вузе (у студента со временем может меняться только число попыток), $w_{lijk}^c \in (0; 1]$.

Таблица 3 Веса текущих видов контроля в семестре по дисциплине «Архитектура компьютеров»

| Вес | Вид контроля |
|------|-------------------------|
| 0,30 | Лабораторная работа № 1 |
| 0,55 | Лабораторная работа № 2 |
| 0,15 | Контрольная работа |

В табл. 3 приведен пример весов текущих видов контроля в семестре по дисциплине «Архитектура компьютеров» из табл. 2 для студентов, обучающихся по направлению «Прикладная математика и информатика».

В табл. 4 указана использованная далее в исследовании зависимость понижающих коэффициентов от числа попыток сдачи видов контроля в модуле текущего контроля в семестре.

В модуле текущего контроля в семестре не ограничивается число пересдач текущих видов контроля. Также некоторые виды контроля могут быть не обязательны для выполнения, а служить для увеличения рейтинга студента по дисциплине (например, выполнение домашнего задания).

Сессионный рейтинг $r_{lij}^s(t)$ из (3) определяется соотношением:

$$r_{lij}^s(t) = \sum_{n=1}^N w_{ijn}^s (m_{lijn}^s(t)w_{lijn}^s(t) + m_{lijn}^e(t)) , \quad (4)$$

где $n = 1, 2, \dots, N$ — номер контрольной точки в модуле сессионного контроля; N — число контрольных точек по j -й дисциплине в модуле сессионного контроля в i -м семестре l -го студента; w_{ijn}^s — вес n -й контрольной точки по j -й дисциплине в модуле сессионного контроля в i -м семестре (данная величина устанавливается методистами факультета и кафедр, одинакова для каждого студента, изучающего данную дисциплину, и остается постоянной на всем протяжении обучения студента в вузе, поэтому не зависит от конкретного студента l и момента времени t), $w_{ijn}^s \in [0; 1]$; $m_{lijn}^s(t)$ — отметка l -го студента в модуле сессионного контроля в i -м семестре по j -й дисциплине за n -ю контрольную точку в t -й момент времени, $m_{lijn}^s(t) \in [0; M]$; $w_{ijn}^s(t)$ — понижающий коэффициент отметки l -го студента, зависящий от числа попыток сдачи n -й контрольной точки по j -й дисциплине в модуле сессионного контроля в i -м семестре в t -й момент времени, для каждого вида контроля в модуле сессионного контроля зависимость понижающего коэффициента от числа попыток определяется методистами вуза, факультета и кафедры и остается постоянной на всем протяжении обучения студента в вузе (у студента со временем может меняться только число попыток), $w_{ijn}^s(t) \in (0; 1]$; $m_{lijn}^e(t)$ — дополнительные баллы в модуле сессионного контроля l -го студента, полученные им при пересдаче на повышенную отметку в i -м семестре по j -й дисциплине n -й контрольной точки в t -й момент времени, причем пересдавать на повышенную отметку можно только те контрольные точки, отметки за которые учитываются в дипломе студента, максимально возможные значения величины $m_{lijn}^e(t)$ устанавливаются методистами вуза и факультета и не изменяются на всем протяжении обучения студента в вузе, причем должны выполняться следующие условия:

$$m_{lijn}^e(t) \geq 0; \quad 0 \leq m_{lijn}^s(t) + m_{lijn}^e(t) \leq M.$$

Таблица 4 Зависимость понижающих коэффициентов в модуле текущего контроля в семестре

| Число попыток сдачи видов контроля | Понижающий коэффициент $w_{lijk}^c(t)$ |
|------------------------------------|--|
| 1 | 1,0 |
| 2 | 0,9 |
| 3 | 0,8 |
| 4 и более | 0,7 |

Таблица 5 Веса сессионных видов контроля по дисциплинам в семестре

| Вес w_{ijn}^s | Наименование дисциплины | Вид контроля |
|-----------------|-------------------------|-----------------|
| 1,0 | Алгебра и геометрия | Экзамен |
| 1,0 | Архитектура компьютеров | Зачет с оценкой |
| 1,0 | Дискретная математика | Экзамен |
| 1,0 | Иностранный язык-1 | Зачет |
| 0,4 | Математический анализ | Курсовая работа |
| 0,6 | Математический анализ | Экзамен |
| 0,4 | Основы информатики | Курсовой проект |
| 0,6 | Основы информатики | Экзамен |
| 1,0 | Физическая культура | Зачет |
| 1,0 | Философия | Зачет с оценкой |

Таблица 6 Зависимость понижающих коэффициентов в модуле сессионного контроля

| Число попыток сдачи видов контроля | Понижающий коэффициент $w_{lijn}^s(t)$ |
|------------------------------------|--|
| 1 | 1,0 |
| 2 | 0,9 |
| 3 | 0,8 |
| 4 | 0,7 |

В табл. 5 приведен пример весов сессионных видов контроля в семестре по дисциплинам из табл. 2 для студентов, обучающихся по направлению «Прикладная математика и информатика».

В табл. 6 указана использованная далее в исследовании зависимость понижающих коэффициентов от числа попыток сдачи сессионных видов контроля. Число пересдач сессионных видов контроля ограничено. Если после 3-й пересдачи студент не сдает сессионный

вид контроля на удовлетворительную оценку, то его автоматически отчисляют. Поэтому возможность студентов пересдавать сессионный вид контроля более трех раз не рассматривается.

Рейтинг личностных характеристик $r_{lij}^p(t)$ из (3) определяется соотношением:

$$r_{lij}^p(t) = w^a \frac{M}{G} \sum_{g=1}^G a_{lijg}(t) + w^b \min \left(\sum_{v=1}^V b_{lijv}(t), M \right) - w^f \min \left(\sum_{d=1}^D f_{lijd}(t), M \right),$$

где $g = 1, 2, \dots, G$ — номер занятия; G — количество занятий по j -й дисциплине в i -м семестре l -го студента; $v = 1, 2, \dots, V$ — номер бонуса; V — количество бонусов по j -й дисциплине в i -м семестре l -го студента; $d = 1, 2, \dots, D$ — номер штрафа; D — количество штрафов по j -й дисциплине в i -м семестре l -го студента; w^a — вес посещаемости студентом занятий по дисциплине в модуле личных характеристик, $w^a \in [0; 1]$; w^b — вес бонусов студента по дисциплине в модуле личных характеристик, $w^b \in [0; 1]$; w^f — вес штрафов студента по

дисциплине в модуле личных характеристик, $w^f \in [0; 1]$ (величины w^a , w^b и w^f одинаковы для каждого студента во всех семестрах для всех дисциплин, устанавливаются методистами вуза и остаются постоянными на всем протяжении обучения студента в вузе, поэтому не зависят от индексов l , i , j , g , v , d и момента времени t), $w^a + w^b + w^f = 1$ (на взгляд авторов, целесообразно использовать следующие значения весов: $w^a = 0,4$; $w^b = 0,3$; $w^f = 0,3$); $a_{lijg}(t)$ — отметка посещаемости l -го студента в i -м семестре по j -й дисциплине g -го занятия в t -й момент времени, $a_{lijg}(t) \in \{0, 1\}$, причем $a_{lijg}(t) = 0$ при пропуске по неуважительной причине студентом в i -м семестре по j -й дисциплине g -го занятия в t -й момент времени, иначе $a_{lijg}(t) = 1$; $b_{lijv}(t)$ — отметка l -го студента в i -м семестре по j -й дисциплине за v -й бонус в t -й момент времени, $b_{ijvt} \in [0; M]$; $f_{lijd}(t)$ — отметка l -го студента в i -м семестре по j -й дисциплине за d -й штраф в t -й момент времени, $f_{ijdt} \in [0; M]$.

Бонусы по дисциплине могут назначаться за ведение научной работы, выступления на конкурсах и олимпиадах по профессиональной тематике, спортивные достижения и т. п.

Штрафы по дисциплине могут назначаться за списывание, подделку отметок в зачетной книжке или ведомости, некорректное поведение студента на занятиях и т. п.

3 Анализ сессионной составляющей рейтинга

Помимо собственно методики расчета рейтинга, предметом исследования в данной статье является сессионная составляющая семестрового рейтинга студента $r_{lij}^s(t)$, вычисляемая по формуле (4). Для ее анализа воспользуемся также соотношениями (2) и (3), причем в (2) веса $w_{ij} = 1 \forall i \forall j$, $i = 1, 2, \dots, I$, $j = 1, 2, \dots, J$, в (3) веса $w^c = 0$, $w^s = 1$, $w^p = 0$, в (4) веса $w_{ijn}^s = 1 \forall i \forall j \forall n$, $i = 1, 2, \dots, I$, $j = 1, 2, \dots, J$, $n = 1, 2, \dots, N$.

Рассмотрим случайную величину R , равную сессионной составляющей семестрового рейтинга случайным образом выбранного студента на курсе в фиксированный момент времени t в определенном семестре i . Реализацией этой случайной величины будет рейтинг $r_l = r_{li}(t)$, $l = 1, 2, \dots, L$, L — число студентов на курсе, для которых доступна информация о текущем рейтинге за текущую сессию (далее индекс i и зависимость от t опускаются). Для анализа успеваемости студентов предлагается следующее.

1. Исследование закона распределения случайной величины R (в данной работе для этого используется критерий Пирсона [15]).
2. Квантильный анализ сессионного рейтинга студентов.
3. Проверка качества оценивания знаний студентов в учебной группе за сессионные виды контроля, выявление необходимости переработки заданий из контрольно-измерительных учебных материалов (для этого используется статистический Т-критерий Уилкоксона [16, 17]).

Рассмотрим каждый из этих пунктов более подробно.

Знание закона распределения случайной величины R может оказаться полезным для разных целей, в частности для обеспечения возможности статистически обосновано выявить студентов с низкой и высокой успеваемостью. Предлагаемый метод статистически обоснованного определения студентов с высокой успеваемостью как претендентов на поощрение, так и сильно неуспевающих студентов, которым в дальнейшем может грозить отчисление, состоит в следующем.

Выбираем за определенный семестр сессионные рейтинги студентов, продолжающих обучение. Используем критерий Пирсона для проверки на уровне доверия p гипотезы о том, что выборка соответствует гауссовскому распределению.

Если гипотеза принимается, то оцениваются параметры закона распределения: используются стандартные оценки в виде выборочного среднего

$$\widehat{M[R]} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L r_l$$

и выборочной дисперсии

$$\widehat{D[R]} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left(r_l - \widehat{M[R]} \right)^2.$$

Для определения сильно неуспевающих студентов и студентов, претендующих на поощрение (премирование) используются соответствующие гауссовские квантили x_α и $x_{1-\alpha}$ соответственно уровней значимости α и $1 - \alpha$, где α — величина, подлежащая выбору исследователя (в рассматриваемых далее примерах $\alpha = 0,1$).

Если студент l имеет рейтинг $r_l \leq x_\alpha$, то он считается сильно неуспевающим. В дальнейшем он рискует быть отчисленным из-за проблем с успеваемостью. К такому студенту необходимо применять меры организационного характера.

Если студент l имеет рейтинг $r_l \geq x_{1-\alpha}$, то он считается претендентом на получение поощрения (премии).

Если студент l имеет рейтинг $x_\alpha < r_l < x_{1-\alpha}$, то он считается нормально успевающим по итогам сессии.

В данном случае в сессионном рейтинге для оценки знаний студентов используется 5-балльная шкала. Отметки «Неявка», «Недопуск деканатом», «Недопуск кафедрой» соответствуют 0 баллам.

Отметки по зачетам не рассматриваются, так как студенты, не сдавшие зачеты, автоматически отчисляются, а студенты, сдавшие все зачеты, будут иметь одинаковый рейтинг.

В качестве тестовых данных была взята успеваемость студентов с I по III курс факультета «Прикладная математика и физика» в МАИ за 3 года (2011–2014). В результате проверки гипотезы о гауссовском распределении сессионных рейтингов студентов с учетом числа попыток сдачи различных видов контроля на уровне доверия $p = 0,9$ в восьми случаях из девяти подтверждено гауссовское

Таблица 7 Результаты проверки критерия Пирсона

| Год поступления | Семестр | Число студентов | Число степеней свободы $n - 2$ | $\widehat{M}[R]$ | $\widehat{D}[R]$ | $x_{0,9}(n)$ уровня 0,9 распределения $\chi^2(n - 1)$ | Статистика Пирсона | Гипотеза о гауссовском распределении |
|-----------------|---------|-----------------|--------------------------------|------------------|------------------|---|--------------------|--------------------------------------|
| 2013/14 | 1 | 118 | 14 | 3,51 | 0,32 | 21,06 | 7,77 | Принимается |
| 2012/13 | 1 | 94 | 17 | 3,78 | 0,23 | 24,77 | 21,87 | Принимается |
| 2012/13 | 2 | 92 | 11 | 3,72 | 0,25 | 17,28 | 7,20 | Принимается |
| 2012/13 | 3 | 92 | 19 | 3,43 | 0,34 | 27,20 | 19,41 | Принимается |
| 2011/12 | 1 | 101 | 17 | 3,73 | 0,21 | 24,77 | 6,05 | Принимается |
| 2011/12 | 2 | 102 | 12 | 3,57 | 0,30 | 18,55 | 10,81 | Принимается |
| 2011/12 | 3 | 105 | 19 | 3,44 | 0,29 | 27,20 | 59,68 | Отвергается |
| 2011/12 | 4 | 107 | 26 | 3,50 | 0,29 | 35,56 | 34,49 | Принимается |
| 2011/12 | 5 | 107 | 16 | 3,52 | 23,54 | 24,77 | 6,44 | Принимается |

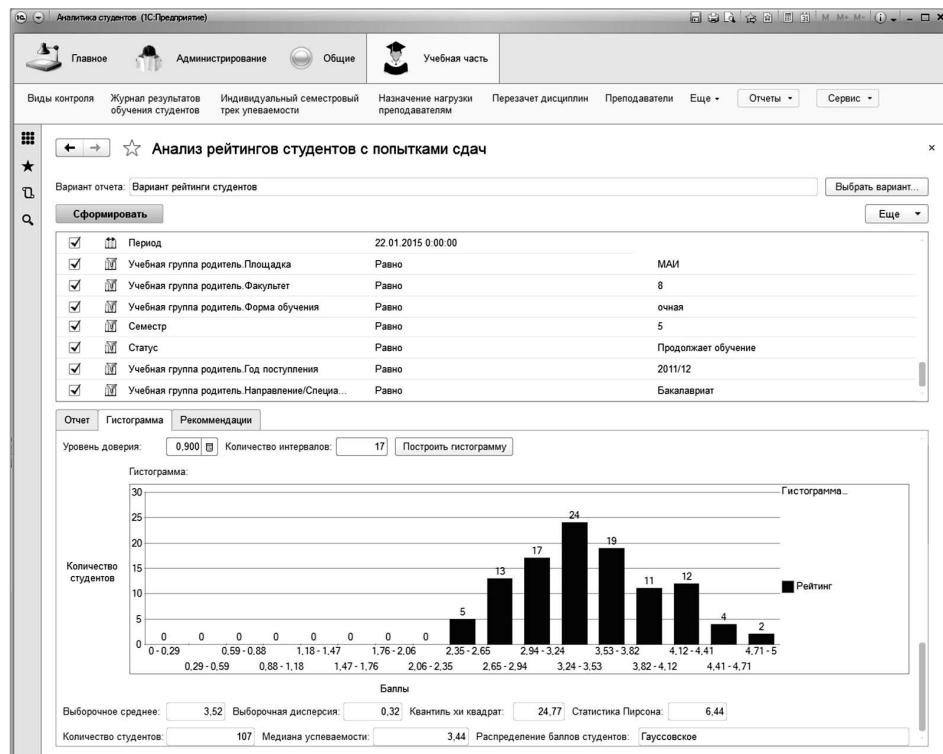
распределение, а значит, и возможность определять студентов с высокой и низкой успеваемостью с помощью гауссовых квантилей (табл. 7).

Проведенные расчеты выполнены с помощью программной системы поддержки принятия решений [18, 19], разработанной на технологической платформе 1С:Предприятие 8.3 [20, 21]. Пример программного интерфейса представлен на рисунке. Для учета числа попыток студентов сдачи видов контроля используются понижающие коэффициенты из табл. 6.

Разработанная программная система, в частности, обеспечивает на основе статистического анализа выработку рекомендаций по отчислению или поощрению студентов. Например, определение студентов с высокой и низкой успеваемостью для студентов III курса в V семестре на уровне значимости $\alpha = 0,1$ дало следующие результаты. Граница высокой успеваемости равна квантили $x_{0,9} = 4,41$. Граница низкой успеваемости равна квантили $x_{0,1} = 2,65$. Из 107 студентов 6 рекомендованы к поощрению, а 5 имеют риск к отчислению.

Критерий Пирсона отверг гипотезу о гауссовом распределении рейтингов студентов только в III семестре для студентов 2011/2012 года поступления. В этом случае нельзя использовать предложенный выше вариант для определения студентов с низкой или высокой успеваемостью. Данная аномалия была вызвана тем, что очень большое число студентов получило рейтинг в интервале от 3 до 3,25 баллов по сравнению с другими интервалами.

В случае когда во время текущей сессии критерий Пирсона отвергает гипотезу о гауссовом распределении рейтингов студентов, для определения студентов с низкой или высокой успеваемостью предлагается использовать вместо гауссов-



Результаты проверки критерия Пирсона

ских квантилей x_α и $x_{1-\alpha}$ выборочные квантили тех же уровней значимости. Для этого по выборке r_1, r_2, \dots, r_l из распределения случайной величины R строится вариационный ряд и в качестве выборочных квантилей \hat{x}_α и $\hat{x}_{1-\alpha}$ используются соответственно $([\alpha L] + 1)$ -й и $((1 - \alpha)L + 1)$ -й члены вариационного ряда, где $[\cdot]$ — целая часть числа.

Анализ, проведенный с помощью выборочных квантилей на уровне значимости $\alpha = 0,1$ в III семестре для студентов 2011/2012 года поступления, дал следующие результаты. Граница высокой успеваемости равна выборочной квантили $\hat{x}_{0,9} = 4,38$. Граница низкой успеваемости равна выборочной квантили $\hat{x}_{0,1} = 2,98$. Из 105 студентов 11 рекомендованы к поощрению, а 13 имеют риск отчислению.

Рассмотрим теперь способ проверки качества проведения контрольных мероприятий по различным дисциплинам внутри учебной группы с помощью статистического Т-критерия Уилкоксона. Данный критерий предназначен для проверки показателей, измеренных в двух разных условиях на одной и той же выборке

испытуемых. Он, в частности, позволяет проверить однородность двух выборок, состоящих из оценок студентов одной и той же группы, полученных по двум различным видам контроля.

Определим i -й семестр и момент времени t , при которых будем исследовать сессионную успеваемость студентов, поэтому далее индекс i и зависимость от t опускаются. Выберем случайным образом учебную группу студентов для исследования. Пусть $l = 1, 2, \dots, L$ — номер случайно выбранного студента в группе, L — число студентов в данной группе. Пусть $j = 1, 2, \dots, J$ — номер дисциплины, изучаемой в данной группе, J — количество дисциплин в данном семестре для данной учебной группы; $n = 1, 2, \dots, N$ — номер сессионного вида контроля по j -й дисциплине для данной учебной группы, N — число контрольных точек по j -й дисциплине для данной учебной группы.

Рассмотрим случайную величину Z_{in} , равную отметке случайным образом выбранного студента учебной группы по n -му выбранному виду сессионного контроля по j -й дисциплине.

Отметки студентов z_{ljn} , $n = 1, \dots, L$, данной учебной группы по дисциплинам j с соответствующими видами контроля n составляют реализацию выборки $z_{jn}^h = \{z_{1jn}, z_{2jn}, \dots, z_{Ljn}\}$ для исследования, где номер выборки $h = 1, 2, \dots, U$, $U = J \times N$ — количество выборок. Из данного набора выборок будем попарно выбирать выборки и проверять их на однородность с помощью критерия Уилкоксона. Наибольшую группу выборок, попарно однородных между собой, объединим в общую структуру, которую назовем **склейкой** выборок.

В данном случае при объединении элементов выборок в склейке оказываются отметки, полученные одними и теми же студентами. Поэтому в дальнейшем при работе со склейкой не применяются статистические критерии, не используются математическое ожидание, дисперсия и другие статистические функции. Однако можно предложить следующий эвристический алгоритм определения «особых» выборок, для которых соответствующие дисциплины и преподаватели, осуществляющие соответствующие формы контроля, требуют особого внимания.

1. Берутся выборки отметок студентов одной из учебных групп по дисциплинам за сессионные виды контроля.
2. Осуществляется попарная проверка однородности выборок друг с другом с помощью Т-критерия Вилкоксона.
3. Выборки, попарно однородные между собой, попадают в общую склейку.
4. Выбирается наибольшая по числу элементов склейка. Выборки баллов студентов группы по дисциплинам с соответствующими видами контроля, попавшие в общую склейку, считаются нормально оцененными преподавателями. Соответствующая каждой такой выборке дисциплина с видом контроля объединяется в **эталонный набор дисциплин и видов контроля**. Для общей склейки вычисляется среднее арифметическое ее элементов, обозначим это значение как Ξ .

5. Вычисляется среднее арифметическое элементов тех выборок, которые не попали в общую склейку, обозначим их значения как E_{jn} , где j и n — номер дисциплины и соответствующего вида контроля, не вошедшего в общую склейку.
6. Проверяются следующие условия:
 - если $E_{jn} > \Xi + \varepsilon$, то считается, что отметки по n -му сессионному виду контроля по j -й дисциплине в данном семестре в данный момент времени в данной учебной группе завышены;
 - если $E_{jn} < \Xi - \varepsilon$, то считается, что отметки по n -му сессионному виду контроля по j -й дисциплине в данном семестре в данный момент времени в данной учебной группе занижены;
 - если $|E_{jn} - \Xi| < \varepsilon$, то считается, что отметки по n -му сессионному виду контроля по j -й дисциплине в данном семестре в данный момент времени в данной учебной группе поставлены нормально.

Здесь и далее ε — настроенный параметр алгоритма, определяемый методистом.

Разработанная программная система реализует логику предложенного выше метода и позволяет выявлять дисциплины, по которым были занижены или завышены отметки студентов, и дисциплины, по которым студентов оценили нормально. В качестве примера рассмотрим результаты статистического анализа сессионной успеваемости студентов I курса группы 8О-103Б-13 в I семестре 2013/2014 учебного года на факультете «Прикладная математика и физика» в МАИ.

Численность группы — 18 студентов. На уровне доверия $p = 0,95$ с помощью Т-критерия Уилкоксона был выявлен следующий эталонный набор дисциплин и видов контроля:

- дисциплина «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», вид контроля — экзамен;
- дисциплина «Философия», вид контроля — рейтинг;
- дисциплина «Основы информатики», вид контроля — курсовой проект;
- дисциплина «Математический анализ», вид контроля — экзамен;
- дисциплина «Архитектура компьютеров», вид контроля — рейтинг;
- дисциплина «Теория графов и математическая логика», вид контроля — экзамен.

Параметр ε был выбран равным 0,1. Средний балл эталонного набора $\Xi = 3,28$. Дисциплина «Математический анализ» с видом контроля «курсовая работа» не вошла в эталонный набор. Средний балл по данной дисциплине с данным видом контроля $E_{jn} = 3,78$, $E_{jn} > \Xi + 0,1$; следовательно, отметки студентов по ней завышены.

Дисциплина «Основы информатики» с видом контроля «экзамен» не вошла в эталонный набор. Средний балл по данной дисциплине с данным видом контроля $E_{jn} = 2,89$, $E_{jn} < \Xi - 0,1$; следовательно, отметки занижены.

4 Заключение

В данной работе предложен алгоритм расчета рейтинга студента, учитывающий различные аспекты процесса обучения студента в вузе. Исследованы способы анализа сессионного рейтинга студентов и разработана реализующая их программная система. Результаты функционирования автоматизированной рейтинговой системы оценки сессионной успеваемости студентов успешно апробированы на реальных данных учащихся с I по III курс факультета «Прикладная математика и физика» в МАИ за 3 года (2011–2014).

Литература

1. Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain / Eds. B. Bloom, M. Engelhart, E. Furst, W. Hill, D. Krathwohl. — New York, NY, USA: David McKay, 1956. 113 p.
2. Brown F. Principles of educational and psychological testing. — New York, NY, USA: Rinehart and Winston, 1976. 529 p.
3. Brusilovsky P., Miller P. Web-based testing for distance education // WebNet'99 World Conference of the WWW and Internet Proceedings. — Honolulu, HI, 1999. P. 149–154.
4. ECTS: Европейская система перевода и накопления кредитов и приложение к диплому. — Брюссель: Directorate-General for Education and Culture, 17 августа 2004 г. <http://www.recep.ru/files/conference/bologna/Isaacs.pdf>.
5. Grade Point Average. — Thompson Rivers University. http://www.tru.ca/admreg/academicrecords/grade_point_average.html.
6. Гресс Е. С., Крылов С. С. Методические аспекты комплексного оценивания компетенций студентов // Качество. Инновации. Образование, 2014. Вып. 4(107). С. 14–19.
7. Гурьянова С. Ю. Качество образования в контексте модернизации высшей школы // Качество. Инновации. Образование, 2013. Вып. 1. С. 3–14.
8. Басыров А. Г., Казанцев Д. И. К вопросу создания инфотелекоммуникационной инфраструктуры вуза // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2013. № 2. С. 37–39.
9. Федеральные государственные образовательные стандарты. — Министерство образования и науки Российской Федерации. <http://old.mon.gov.ru/pro/fgos>.
10. Босов А. В., Гресс Е. С., Крылов С. С. Оценивание объективного рейтинга // Мат-лы X Междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014). — М.: МАИ, 2014. С. 582–583.
11. Zimmerman J., Malone T., Delgado J. More top high schools eliminate class rank // Chicago Tribune News. http://articles.chicagotribune.com/2011-06-09/news/ct-met-class-rank-0609-201106081_high-schools-class-rank-rank-students.

12. Гудилин Е. А., Елисеев А. А., Лукашин А. В., Майков Е. В., Чаркин Д. О. Сборник типовых положений для реализации инновационных образовательных программ в рамках классического университета (вуза) (направление «Химия, физика и механика материалов»). Вып. 1. Балльно-рейтинговая система и взаимодействие с работодателями / Под ред. акад. РАН Ю. Д. Третьякова. — М.: МГУ, 2006. <http://old.fnm.msu.ru/inno/art/reiting.pdf>.
13. П 02.016–2012: Положение о балльно-рейтинговой системе оценки качества освоения основных образовательных программ. — 2-е изд. — Курск: ЮЗГУ, 2012. http://www.swsu.ru/structura/umu/mo/norm_doc/evaluation_system.pdf.
14. Наумов А. В., Джумурат А. С., Иноземцев А. О. Система дистанционного обучения математическим дисциплинам CLASS.NET // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2014. № 10. С. 36–44.
15. Кибзун А. Н., Горяинова Е. Р., Наумов А. В. Теория вероятностей и математическая статистика: Базовый курс с примерами и задачами. — М.: Физматлит, 2007. 232 с.
16. Hollander M., Wolfe D. A. Nonparametric statistical methods. — 2nd ed. — New York, NY, USA: Wiley, 1999. 816 p.
17. W-критерий Уилкоксона. — Портал знаний, глобальный электронный ресурс. http://www.statistica.ru/local-portals/medicine/w-kriteriy-uilkoksona/?sphrase_id=31230.
18. Гресс Е. С., Крылов С. С., Наумов А. В. Автоматизированная модульно-рейтинговая система комплексного оценивания успеваемости студентов // Новые информационные технологии в образовании: Сб. науч. тр. XIII Междунар. науч.-практич. конф. «Технологии 1С для эффективного обучения и подготовки кадров в целях повышения производительности труда». — М.: 1С-Паблишинг, 2013. Ч. 2. С. 55–58.
19. Гресс Е. С., Крылов С. С., Наумов А. В. Реализация модульно-рейтинговой системы МАИ // Мат-лы XVIII Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013). — М.: МАИ, 2013. С. 838–840.
20. 1С:Предприятие 8. <http://v8.1c.ru>.
21. Гресс Е. С., Крылов С. С. Применение технологий «1С» в учебном процессе на примере разработки модульно-рейтинговой системы // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докл. XIX Междунар. науч. конф. — М.: МАИ, 2014. С. 125–127.

Поступила в редакцию 16.02.15

AN APPROACH FOR ASSESSMENT OF AUTOMATIZATION OF STUDENTS ACADEMIC PERFORMANCE

A. V. Bosov¹, E. S. Gress², and A. V. Naumov²

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

²Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, A-80, GSP-3, Russian Federation

Abstract: The article deals with the automation of the analysis of the quality of education in universities. An original algorithm for counting students rating is proposed. Statistical analysis of the sessional rating (marks obtained) and results of the students ranking analysis on the basis of actual data processing are presented. The ways to use the assigned rating, in particular, to encourage (deductions) students and quality control measures are suggested.

Keywords: rating system; quality of education; academic performance of students; statistical criteria; information system

DOI: 10.14357/08696527150208

References

1. Bloom, B., M. Engelhart, E. Furst, W. Hill, and D. Krathwohl, eds. 1956. *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain*. New York, NY: David McKay. 113 p.
2. Brown, F. 1976. *Principles of educational and psychological testing*. New York, NY: Rinehart and Winston. 529 p.
3. Brusilovsky, P., and P. Miller. 1999. Web-based testing for distance education. *WebNet'99 World Conference of the WWW and Internet Proceedings*. Honolulu. 149–154.
4. ECTS. 2004. Evropeyskaya sistema perevoda i nakopleniya kreditov i prilozhenie k diplomu [The European Credit Transfer and Accumulation System and the diploma attachment]. Brussels: Directorate-General for Education and Culture. Available at: <http://www.recep.ru/files/conference/bologna/Isaacs.pdf> (accessed March 15, 2015).
5. Grade Point Average. Thompson Rivers University. Available at: http://www.tru.ca/admreg/academicrecords/grade_point_average.html (accessed March 15, 2015).
6. Gress, E. S., and S. S. Krylov. 2014. Metodicheskie aspekty kompleksnogo otsenivaniya kompetentsiy studentov [Methodological aspects of complex assessment of students' competences]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education] 107(4):14–19.
7. Guryanova, S. Yu. 2013. Kachestvo obrazovaniya v kontekste modernizatsii vysshey shkoly [Quality of education in the context of higher school modernization]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education] 92(1):3–14.

8. Basyrov, A. G., and D. I. Kazantsev. 2013. K voprosu sozdaniya infotelekomunikatsionnoy infrastruktury vuza [On a university infrastructure infotelecommunication]. *Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technology] 2:37–39.
9. Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossiiyskoy Federatsii: Federal'nye gosudarstvennye obrazovatel'nye standarty [The Ministry of Education and Science of the Russian Federation: Federal State Educational Standards]. Available at: <http://old.mon.gov.ru/pro/fgos/> (accessed March 15, 2015).
10. Bosov, A. V., E. S. Gress, and S. S. Krylov. 2014. Otsenivanie ob"ektivnogo reytinga [Objective rating assessment]. *Mat-ly X Mezhdunar. konf. po neravnovesnym protsessam v soplakh i struyakh (NPNJ'2014)* [10th Conference (International) on Nonequilibrium Processes in Nozzles and Jets (NPNJ'2014) Proceedings]. Moscow: MAI. 582–583.
11. Zimmerman, J., T. Malone, and J. Delgado. More top high schools eliminate class rank. *Chicago Tribune News*. Available at: http://articles.chicagotribune.com/2011-06-09/news/ct-met-class-rank-0609-20110608_1_high-schools-class-rank-rank-students (accessed March 15, 2015).
12. Gudilin, E. A., A. A. Eliseev, A. V. Lukashin, E. V. Maykov, and D. O. Charkin. 2006. Ball'no-reytingovaya sistema i vzaimodeystvie s rabotodatelyami [Point-rating system and cooperation with employers]. *Sbornik tipovykh polozheniy dlya realizatsii innovatsionnykh obrazovatel'nykh programm v ramkakh klassicheskogo universiteta (vuza) (napravlenie "Khimiya, fizika i mekhanika materialov")* [The Collection of model provisions for the implementation of innovative educational programs within the framework of classical University (direction “Chemistry, materials physics, and mechanics”)]. Ed. Yu. D. Tret'yakov. Moscow: MSU. Iss. 1. Available at: <http://old.fnm.msu.ru/inno/art/reiting.pdf> (accessed March 15, 2015).
13. P 02.016-2012. 2012. Polozhenie o ball'no-reytingovoy sisteme otsenki kachestva osvoeniya osnovnykh obrazovatel'nykh programm [Statute of a point-rating system of assessment of quality of mastering basic educational programs]. 2nd ed. Kursk: SWSU. Available at: http://www.swsu.ru/structura/umu/mo/norm_doc/evaluation_system.pdf (accessed March 15, 2015)
14. Naumov, A. V., A. S. Dzhumurat, and A. O. Inozemtsev. 2014. Sistema distantsionnogo obucheniya matematicheskim distsiplinam CLASS.NET [Distance learning system for mathematical disciplines CLASS.NET]. *Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technology] (10):36–44.
15. Kibzun, A. N., E. R. Goryainova, and A. V. Naumov. 2007. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: Bazovyy kurs s primerami i zadachami* [Probability theory and mathematical statistics: Basic course with examples and tasks]. Moscow: Fizmatlit. 232 p.
16. Hollander, M., and D. A. Wolfe. 1999. *Nonparametric statistical methods*. 2nd ed. New York, NY: Wiley. 816 p.
17. W-kriteriy Uilkoksona. Portal znaniy, global'nyy elektronnyy resurs [Wilcoxon signed-rank test. Knowledge Portal, Global Intellectual Resource]. Available at: <http://www.statistica.ru/local-portals/medicine/w-kriteriy-uilkoksona> (accessed March 15, 2015).
18. Gress, E. S., S. S. Krylov, and A. V. Naumov. 2013. Avtomatizirovannaya modul'no-reytingovaya sistema kompleksnogo otsenivaniya uspevaemosti studentov [Automatic

- module ranking system of comprehensive assessment students advancement]. *Novye informatsionnye tekhnologii v obrazovanii: Sbornik nauchnykh tr. XIII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. "Tekhnologii 1S dlya effektivnogo obucheniya i podgotovki kadrov v tselyakh povysheniya proizvoditel'nosti truda"* [The Collection of Research Papers of the 13rd Research and Practical Conference (International) on 1C Technology for Effective Learning and Training Cadres for Advancement of Labor Productivity]. Moscow: 1C Publishing. (2):55–58.
19. Gress, E. S., S. S. Krylov, and A. V. Naumov. 2013. Realizatsiya modul'no-reytingovoy sistemy MAI [Implementation of the module grading system MAI]. *Mat-ly XVIII Mezhdunar. konf. po vychislitel'noy mekhanike i sovremennym prikladnym programmnym sistemam (VMSPPS'2013)* [18th Conference (International) on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMASS'2013) Proceedings]. Moscow: MAI. 838–840.
20. 1S:Predriyatiye 8 [1C:Enterprise 8]. Available at: <http://v8.1c.ru> (accessed March 15, 2015).
21. Gress, E. S., and S. S. Krylov. 2014. Primenenie tekhnologiy “1S” v uchebnom protsesse na primere razrabotki modul’no-reytingovoy sistemy [Module grading system as example of using 1C technology in educational process]. *Sistemnyy analiz, upravlenie i navigatsiya: Tezisy dokladov XIX Mezhdunar. nauch. konf.* [19th Scientific Conference on System Analysis, Management and Navigation International: Article abstracts]. Moscow: MAI. 125–127.

Received February 16, 2015

Contributors

Bosov Alexey V. (b. 1969) — Doctor of Science in technology, Head of Department, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; AVBosov@ipiran.ru

Gress Ekaterina S. (b. 1990) — PhD student, Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, A-80, GSP-3, Russian Federation; gress@mai.ru

Naumov Andrey V. (b. 1966) — Doctor of Science in physics and mathematics, associate professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, A-80, GSP-3, Russian Federation; naumovav@mail.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ КОНTRАСТИВНЫХ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ: ЭЛЕКТРОННЫЕ КОРПУСА ТЕКСТОВ*

М. Г. Кружков¹

Аннотация: Рассматриваются информационные ресурсы, используемые в контрастивных лингвистических исследованиях, и их основные характеристики. Основными видами таких информационных ресурсов являются типологические базы данных (ТБД) и электронные корпуса текстов. В рамках данной работы основное внимание уделяется электронным корпусам, среди которых наиболее релевантными для проведения контрастивных исследований являются сопоставимые корпуса, представляющие собой сбалансированные собрания оригинальных текстов на сравниваемых языках, и параллельные (переводные) корпуса, представляющие собой собрания оригинальных текстов на одном из сравниваемых языков, дополненные переводом на другой язык (или несколькими переводами на один или несколько языков). В дополнение к описанию известных информационных ресурсов для поддержки контрастивных лингвистических исследований определяется новый тип таких ресурсов: «надкорпусные кросслингвистические базы данных». Даётся описание основных характеристик таких баз данных (БД) в сопоставлении с электронными корпусами текстов и обосновывается необходимость их формирования.

Ключевые слова: контрастивная лингвистика; базы данных; типологические базы данных; сопоставимые корпуса; параллельные корпуса; надкорпусные кросслингвистические базы данных

DOI: 10.14357/08696527150209

1 Введение

Данная статья является продолжением предыдущей работы [1], также посвященной рассмотрению информационных ресурсов контрастивных лингвистических исследований. Как отмечалось в работе [1], контрастивная лингвистика является одним из направлений современной лингвистики, которое ставит перед собой задачу сравнения языковых явлений, наблюдаемых в различных естественных языках. Контрастивные лингвистические исследования имеют как теоретическое, так и прикладное значение, позволяя выявлять общие особенности языков и специфичные характеристики отдельных языков. С одной стороны,

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-06-00403).

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, magnit75@yandex.ru

контрастивная лингвистика дает материал для языковой типологии и для выявления языковых универсалий, с другой стороны, она непосредственно связана с различными образовательными дисциплинами, такими как преподавание иностранных языков, теория и практика перевода [2], а также используется при создании систем машинного перевода.

В лингвистике традиционный ручной сбор исходных данных, которые необходимы для проведения экспериментальных исследований, часто является трудоемким и дорогостоящим этапом работы. Формирование информационных ресурсов в форме электронных корпусов и БД позволяет существенно экономить время для проведения лингвистических исследований [3–6], что в особенности актуально для задач контрастивной лингвистики, в процессе решения которых сопоставляются тексты на разных языках.

В конце прошлого века сформировалась потребность в развитии инструментария, позволяющего, с одной стороны, эффективно хранить и обрабатывать большие объемы текстов на разных языках и, с другой стороны, фиксировать результаты экспериментальных и теоретических исследований, получаемые лингвистами в процессе контрастивного анализа. Одним из наиболее эффективных инструментов реализации этих задач являются БД. При этом наиболее востребованы БД следующих двух типов:

- (1) компьютерные БД, разработанные в целях проведения типологических исследований (ТБД). Такие БД представляют собой систематизированные сведения об определенных характеристиках различных естественных языков. Этот вид информационных ресурсов был рассмотрен в работе [1].
- (2) электронные корпуса текстов, активно использующиеся при проведении экспериментальных лингвистических исследований. Применительно к задачам контрастивного анализа наиболее релевантными в этом плане являются сопоставимые и параллельные корпуса, которые будут рассмотрены в данной работе.

Тексты корпусов обычно *размечаются* для удобства проведения исследований, т. е. текстам и содержащимся в них языковым единицам (чаще всего словам) приписываются специальные метки. Используется, как правило, морфологическая разметка, но многие корпуса включают в себя также семантическую, синтаксическую, жанровую и другие виды разметки. Размеченные корпуса обеспечиваются специализированными поисковыми системами, реализующими как лексический, так и грамматический виды поиска.

В параллельных корпусах оригинальные и переводные тексты разбиты на фрагменты (обычно включающие в себя одно или несколько предложений или их частей). Соответствующие по смыслу фрагменты оригинального и переводного текстов геометрически выровнены друг с другом, что позволяет пользователю видеть, какой фрагмент текста на языке перевода соответствует данному отрезку текста на языке оригинала, и наоборот — какой отрезок текста на языке оригинала соответствует данному отрезку переводного текста.

Фрагмент русского текста, выровненный с тремя вариантами перевода на французский язык (из повести Н. В. Гоголя «Нос»)

| Оригинал | Перевод1 | Перевод2 | Перевод3 |
|---|--|---|--|
| К счастью, в кондитерской никого не было; мальчишки мели комнаты и расставляли стулья; | Par bonheur, la confiserie était vide; les garçons balayaient les salles et disposaient les chaises. | Le café était heureusement vide; les garçons balayaient les salles et rangeaient les chaises; | Heureusement, ul n'y avait personne dans le salon de thé; les garçons balayaient les salles et rangeaient les chaises; |
| некоторые с сонными глазами выносили на подносах горячие пирожки; на столах и стульях валялись залитые кофеем вчерашние газеты. | Quelques-uns, les yeux bouffis de sommeil, portaient des plateaux chargés de petits pâtés tout chauds; des journaux de la veille, tachés de café, s'éparpillaient sur les tables et sur les chaises. | d'aucuns, les yeux bouffis de sommeil, apportaient des plateaux chargé de patés chauds; les journaux de la veille, maculés de café, jonchaient les tables et les chaises, | certains, avec des yeux endormis, apportaient des pirojki chauds sur des plats; sur les tables et les chaises traînaient les journaux d'hier inondés de caféé. |
| «Ну, слава богу, никого нет, — произнес он, — теперь можно поглядеть». Он робко подошел к зеркалу и взглянул. | “Grâce à Dieu il n'y a perssone! se dit Kovaliov; nous allons bien voir...” Il s'approcha timidement de la glace et regarda: | “Dieu merci, il n'y a personne, je vais pouvoir me regarder!” se dit Kovaliov en s'approchant d'une glace. Mais après un timide coup d'ceil: | “Dieu merci, il n'y a personne, prononça-t-il. Je peux maintenant me regarder.” Il s'approcha timidement de la glace et se jeta un coup d'ceil. |
| «Черт знает что, какая дрянь!» — произнес он, плюнувши. — | “Le diable sait ce que c'est! En voilà une sale histoire! prononça-t-il en crachant. | “Pouah, l'horreur! murmura-t-il, en crachant de dépit. | “Par tous les diables, c'est dégoûtant! s'écria-t-il en crachant. |
| Хотя бы уже что-нибудь было вместо носа, а то ничего!..» | Si au moins il y avait encore quelque chose à la place du nez... mais rien!..” | S'il y avait au moins quelque chose en olace de nez; mais non, rien, eien, rien!..” | Si au moins j'avais quelque chose à la place du nez. Mais alors rien!..” |

Приведенная таблица наглядно иллюстрирует базовую структуру параллельного корпуса: в данном случае фрагмент русского текста выровнен сразу с тремя вариантами перевода на французский язык.

Электронные корпуса и ТБД являются эффективными средствами для проведения контрастивных лингвистических исследований, но это принципиально разные инструменты. Типологические БД включают в себя справочную информацию о свойствах и характеристиках различных языков либо отдельных языковых элементов. Электронные корпуса представляют собой, с одной стороны, (пополняемые) хранилища текстовых и языковых данных, с другой стороны, инструменты, с помощью которых могут быть получены новые лингвистические знания.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы описать различные виды электронных корпусов, используемых в контрастивных лингвистических исследованиях:

- сопоставимые корпуса, представляющие собой сбалансированные собрания оригинальных текстов на сравниваемых языках (разд. 3);
- параллельные (переводные) корпуса, представляющие собой собрания оригинальных текстов с переводом (или с несколькими переводами) на другой язык (разд. 4).

Существует несколько разновидностей параллельных корпусов:

- классические (параграф 4.1);
- двусторонние (параграф 4.2);
- многоязычные (параграф 4.3);
- поливариантные (параграф 4.4).

Рассматриваются основные характеристики каждого из перечисленных видов электронных корпусов и решаемые с их использованием задачи.

Кроме этого, одной из важных целей статьи является описание новой категории так называемых «надкорпусных» БД, представляющих собой надстройки над корпусами, позволяющие сохранять результаты лингвистического анализа. В разд. 5 описаны их основные характеристики и обоснована необходимость их построения в процессе проведения контрастивных исследований.

2 Корпуса текстов и контрастивные лингвистические исследования

В отличие от ТБД, корпуса в явном виде не содержат информацию о характеристиках языка или языков, на которых написаны содержащиеся в них тексты¹. Однако с помощью корпусных методов исследователи могут получать такую информацию. Одним из главных преимуществ корпусных методов по сравнению с ручным анализом текстов или с использованием языковой интуиции

¹ Косвенным образом такая информация может содержаться в размеченном корпусе, так как сама структура разметки включает в себя информацию, например, о частях речи данного языка, о допустимых числах, родах и т. д., но это лишь вспомогательная информация, которую можно извлечь из корпуса при наличии соответствующей разметки. Сама по себе она не позволяет судить о частотности, нормальности или аномальности тех или иных признаков и их сочетаний.

исследователя является то, что они помимо исследования известных явлений позволяют также выявлять и описывать языковые явления, о которых мы ранее имели лишь смутное представление или вовсе ничего не знали [7].

Как правило, исследователь использует корпус либо для поиска примеров определенных языковых единиц или явлений, которые он затем анализирует на качественном уровне, либо для получения статистических данных об их частотности в корпусе или в некоторой его части, *подкорпусе*. Подкорпус может формироваться по различным разрезам — языки публикаций, авторы, жанры, время создания текстов и т. п.

Как упоминалось выше, многие корпуса включают в себя разметку на уровне словоформ или более крупных языковых единиц. Чем богаче и разнообразнее разметка корпуса, тем более гибкие и эффективные поисковые интерфейсы могут быть предоставлены пользователям и тем выше его научная и образовательная ценность. Например, в Национальном корпусе русского языка (НКРЯ) [8] используется шесть типов разметки:

- (1) метатекстовая (тип текста, информация об авторе, время создания и т. д.);
- (2) морфологическая (леммы, грамматические признаки слов);
- (3) синтаксическая (синтаксическая структура предложений);
- (4) акцентная (расстановка тонов и ударений);
- (5) семантическая (семантические признаки и классы слов);
- (6) словообразовательная (данные о составе слов: префиксы, корни, аффиксы).

Корпуса могут быть проблемно-ориентированными или представлять собой универсальный инструмент, позволяющий поддерживать широкий спектр лингвистических исследований. В последнем случае особую ценность приобретают такие характеристики корпуса, как представительность и сбалансированность текстов, включенных в корпус. Сбалансированный корпус должен содержать широкий спектр различных типов письменных и устных текстов (художественные разных жанров, публицистические, научные, деловые, разговорные и т. п.), при этом каждый тип в идеале также должен быть представительным.

Применительно к компаративным лингвистическим исследованиям особую ценность имеют сопоставимые и параллельные корпуса¹. Среди параллельных корпусов можно выделить несколько подтипов, например многоязычные (с переводами на несколько языков) и поливариантные корпуса (с несколькими вариантами перевода на один и тот же язык). В следующих разделах будут подробнее рассмотрены перечисленные виды электронных корпусов и то, как они применяются в сравнительном языкознании.

¹Stig Jonansson называет параллельные корпуса переводными, а термин «параллельный корпус» расширяет и на сопоставимые, и на переводные корпуса [9]. Однако большинство исследователей под термином «параллельный корпус» понимают исключительно параллельные переводные корпуса. Поэтому в статье сопоставимые корпуса позиционируются как отдельный тип корпусов, тем более что они принципиально отличаются от переводных.

3 Сопоставимые корпуса

При проведении контрастивных лингвистических исследований часто используются так называемые *сопоставимые* корпуса [9]. Корпуса на двух или более языках называются сопоставимыми, если они составлялись на основе единых принципов из текстов одних и тех же жанров (например, речь молодежи или тексты новостей). Принципы составления включают в себя правила отбора текстов, порядок их разметки, регулирование допустимых объемов текстов и т. п.

Как правило, в рамках анализа сопоставимых корпусов исследователи хотят сравнить уровень частотности каких-либо явлений в различных языках. Так, в работе [10] сравнивается функционирование pragматических маркеров *vale* и *okay* в речи молодежи в испанском и английском языках, в работе [11] авторы сравнивают функционирование количественных аппроксиматоров в английском и французском языках, а в работе [12] авторы пытаются проследить различия в свойствах темы предложения в различных газетных жанрах в английском и испанском языках.

То, что тексты в сопоставимых корпусах не являются непосредственным переводом друг друга, имеет как недостатки, так и преимущества. С одной стороны, семантическое несовпадение содержания текстов в некоторых случаях может ставить под сомнение обоснованность их сравнения. Вместе с тем если сопоставляемые корпуса достаточно объемные, представляют близкие жанры и при их составлении использовались единые принципы формирования, то сделанные на их основе выводы, касающиеся относительной частотности тех или иных явлений в рассматриваемых языках, несомненно, заслуживают внимания.

Кроме этого, анализ сопоставимых корпусов имеет то преимущество, что тексты в этих корпусах изначально порождаются на языке оригинала, т. е. не являются переводными.

Как известно, переводные тексты отличаются от оригинальных, поскольку на них могут влиять так называемые *факторы перевода* (*translation effects*, см., например, [13]). Одним из наиболее известных факторов перевода является эффект калькирования, суть которого состоит в том, что при переводе особенности конструкций языка оригинала переносятся в конструкции языка перевода, в результате чего переводные тексты по некоторым лексическим или синтаксическим характеристикам значительно отличаются от текстов, изначально написанных на том же языке. Так, Capelle в своем анализе перевода предикатов движения с немецкого и французского показывает, что по тексту перевода можно с большой вероятностью определить, с какого языка он выполнен [14]. Использование сопоставимых корпусов позволяет исключить влияние факторов перевода, которые могут исказить результаты, полученные в результате анализа переводных параллельных корпусов.

Например, можно с определенностью утверждать, что выполнить исследование, результаты которого приведены в работе [11], с помощью переводного

параллельного корпуса было бы невозможно. Остановимся на этом подробнее. В данной работе сравнивается функционирование количественных аппроксиматоров в английском и французском, таких как *около*, *не менее, по крайней мере*, *почти* и т. п., и оценивается частотность употребления грамматических и семантических типов аппроксиматоров. В результате исследования, в частности, выяснилось, что во французском языке в 2–3 раза чаще указывается диапазон значений (например, *от 5 до 15 дней*), чем в английском. Очевидно, что при использовании переводного корпуса этот результат невозможно было бы получить, поскольку переводчики почти всегда переводят подобные выражения буквально (сложно представить, чтобы вышеупомянутое выражение было переведено, например, как *около 10 дней*).

Таким образом, целесообразность использования сопоставимых корпусов зависит от объекта и предмета исследования: чем буквальнее осуществляется перевод конструкций данного типа, тем больше оснований предпочесть сопоставимые корпуса переводным. Степень буквальности перевода может зависеть как от самого характера рассматриваемого языкового явления, так и от жанра текста: в частности, новостные тексты обычно переводятся более буквально, чем художественная литература.

Двусторонние параллельные корпуса (см. параграф 4.2) также можно использовать как сопоставимые, если массивы оригинальных текстов в них сбалансированы. При этом возможно сопоставление как оригинальных, так и переводных текстов, а также сопоставление оригинальных и переводных текстов на одном и том же языке [9].

4 Параллельные корпуса

Несмотря на некоторые описанные выше преимущества сопоставимых корпусов, большая часть контрастивных лингвистических исследований проводится на основе параллельных (переводных) корпусов. В простейшем случае параллельные корпуса представляют собой собрание текстов на языке оригинала, снабженные одним переводом на некоторый язык («классические» параллельные корпуса). Однако существует несколько их разновидностей:

- *двусторонние параллельные корпуса* включают в себя одновременно переводы с языка X на язык Y и переводы с языка Y на язык X;
- *многоязычные параллельные корпуса* включают в себя тексты на языке оригинала, выровненные с несколькими переводами на различные языки, как правило, по одному переводу на один язык;
- *поливариантные параллельные корпуса* включают в себя тексты на языке оригинала, выровненные с более чем одним переводом на другой язык.

Далее будут рассмотрены примеры использования параллельных корпусов разных типов в контрастивных лингвистических исследованиях.

4.1 Классические параллельные корпуса

В работе [15] с помощью англо-испанского параллельного корпуса анализируются языковые средства испанского языка, использующиеся для передачи английского аффиксального отрицания. Цель исследования — проверка гипотезы о том, что, несмотря на то что между английскими и испанскими отрицательными аффиксами прослеживаются очевидные соответствия, на практике их употребление в этих языках значительно различается. Авторы разработали типологию языковых средств испанского языка, которые могут использоваться для перевода отрицательных аффиксов английского языка, и, обработав корпус, получили количественные данные по частотности использования этих средств в переводах. Полученные результаты свидетельствуют о различиях в функционировании рассматриваемых языковых средств в английском и испанском языке. Наиболее типичные переводные соответствия рассматриваются на качественном уровне с подробным разбором примеров.

В заключении своей работы авторы задаются вопросом, в полной ли мере в переводах отражаются нормы испанского языка или же переводные тексты подчиняются иным нормам, отличным от стандартных норм испанского (в последнем случае следует согласиться с выводами, сделанными, например, в работе [16], о том, что переводные тексты образуют некоторый «промежуточный код» или «диалект» языка, на который осуществляется перевод). Чтобы найти ответ на поставленный вопрос, авторы сравнивают данные, полученные из параллельного англо-испанского корпуса, с данными независимого моноязычного испанского корпуса. Проведенное сравнение свидетельствует о значительных расхождениях в употреблении языковых средств в переводных и оригинальных испаноязычных текстах, что может быть связано, например, с тем, что переводчики часто склонны выполнять перевод излишне буквально (см. также разд. 3 о проблеме факторов перевода).

В работе [17] автор ставит своей целью продемонстрировать, что параллельные корпуса позволяют выявлять семантические изменения, которые происходят в языке. Анализируя переводы французской конструкции *quand t'ête*¹ на английский язык, автор пытается показать, что ее значение в значительной мере сместилось от традиционного противительного к реляционному. Параллельные корпуса позволяют увидеть, каким образом разные переводчики интерпретируют значение той или иной конструкции в различных контекстах.

Общее число выделенных переводных соответствий для *quand t'ête* было относительно невелико — около 250. В связи с этим некоторые единично встречающиеся переводы сложно квалифицировать как типичные, хотя, вполне вероятно, они таковыми и являются — например, перевод *quand t'ête* через *you have to admit* и т. п. И напротив: некоторые переводы, встречающиеся более одного раза, например *so*, представляются не вполне удачными и плохо переда-

¹Основные возможные переводные соответствия конструкции *quand t'ête* на русском языке: *если бы даже, все-таки, несмотря ни на что, вопреки всему, во что бы то ни стало.*

ющими смысл изначального выражения. Наконец, в некоторых случаях перевод не позволяет провести различие между противительным и реляционным значениями *quand tême*, поскольку в нем могут использоваться столь же многозначные единицы. Тем не менее полученные количественные данные свидетельствуют о том, что в переводах конструкций с *quand tême* примерно в 50% случаев противительное значение отсутствует, что позволяет с большой степенью уверенности утверждать, что значение *quand tême* с течением времени действительно сместилось от противительного к противительно-реляционному.

В заключение автор указывает на необходимость принимать во внимание роль побочных контекстных эффектов, оказывающих влияние на окончательный выбор переводчика. В этой связи он цитирует работу [18], где данной проблеме уделяется пристальное внимание:

«Перевод редко представляет собой буквальное отображение оригинала на языке перевода <...> Очевидно, есть множество причин, которые могут заставить переводчика предпочесть тот или иной вариант перевода. Переводчики не переводят отдельные слова или конструкции; скорее они заняты поиском соответствий для употребления определенных лингвистических элементов в определенных контекстах. В результате, при определении переводного соответствия для некоторого элемента часто приходится полагаться только на интуицию эксперта».

В этой связи приобретает особое значение возможность сопоставления переводов одних и тех же текстов на один и тот же язык различными переводчиками, что становится возможным при использовании *поливариантных корпусов* (см. параграф 4.4), а также привлечения экспертов для анализа различных вариантов перевода.

4.2 Двусторонние параллельные корпуса

Двусторонние корпуса включают в себя одновременно переводы с языка *X* на язык *Y* и переводы с языка *Y* на язык *X*. Можно сказать, что двусторонний корпус представляет собой два корпуса, объединенных под одной «обложкой», однако нужно учитывать, что обычно создатели двусторонних корпусов обеспечивают сбалансированный отбор исходных текстов для обоих языков, в связи с чем они представляют для исследователей гораздо большую ценность, чем два изначально не связанных друг с другом корпуса параллельных текстов с противоположными направлениями перевода.

Двусторонние корпуса также удобны тем, что при их анализе у исследователей есть возможность сравнивать свойства переводных и оригинальных текстов на обоих языках, не обращаясь к отдельным моноязычным корпусам для проведения сравнения. Например, в работе [19] авторы анализируют устойчивые сочетания слов в английском и норвежском языке. В частности, анализ двустороннего англо-норвежского корпуса позволил им установить, что наиболее частотные английские сочетания слов в 2–3 раза чаще встречаются в переводе-

ных английских текстах, чем в текстах, изначально написанных на английском языке, что является ярким примером проявления фактора перевода. Таким образом, как отмечает Johansson [9], использование двустороннего корпуса позволяет проводить различия между собственно языковыми особенностями и явлениями, обусловленными факторами перевода.

Наконец, двусторонние корпуса позволяют рассматривать и сопоставлять способы трансляции различных явлений при переводе в противоположных направлениях, что невозможно сделать ни с помощью обычных параллельных корпусов, ни с помощью сопоставимых корпусов. Например, в работе [20] рассматривается явление «экстрапозиции» клаузы-подлежащего (т. е. переноса клаузы-подлежащего из начала в конец предложения). В частности, было показано, что английские экстрапозиции примерно в 75% случаев переводятся на шведский с помощью аналогичных экстрапозиций, а шведские экстрапозиции только примерно в 60% случаев переводятся на английский с помощью аналогичных экстрапозиций. Это и ряд других подобных сопоставлений позволили авторам заключить, что экстрапозиция клаузы-подлежащего более характерна для шведского языка. Полученные количественные результаты анализируются на качественном уровне, с разбором отдельных примеров и перечислением вероятных причин выявленной тенденции. Результаты данного исследования представляют ценность как для теоретиков контрастивного языкознания, так и, например, для шведских студентов, изучающих английский язык, поскольку они помогают понять, почему даже совершенно грамотная английская речь может порой звучать не вполне естественно.

4.3 Многоязычные параллельные корпуса

Многоязычные параллельные корпуса представляют собой коллекции текстов на языке X с переводами на два или более языков Y_1, Y_2, \dots , как правило, по одному переводу для каждого языка Y_i . Многоязычные корпуса могут использоваться как для углубленного анализа языка оригинала в зеркале переводов на другие языки, так и для сравнения между собой языков перевода, а также для сопоставления всех задействованных языков — и оригинала, и перевода.

Например, в работе [21] исследуются способы выражения отношения «между» в английском и французском языке посредством сравнения переводов ряда художественных текстов с норвежского языка, содержащих в оригинале слово «*mellom*», т. е. «между». До широкого распространения многоязычных корпусов считалось, что идеальным материалом для контрастивного анализа являются «семантико-синтаксические эквиваленции», т. е. максимально возможные приближения к грамматически дословному переводу¹ [22]. Однако такие переводы на практике встречаются довольно редко, поэтому при использовании обычных

¹Например: *And the lovely paths **among** the flower beds, strewn with crushed shells! — Et les jolies sentiers **entre** les plates-bandes, recouverts de sable!* [И прелестные дорожки между клумбами, посыпанные ракушечником!]

параллельных корпусов постоянно возникает вопрос о правомерности сравнения неконгруэнтных конструкций. Структура многоязычного параллельного корпуса позволяет принять текст на языке оригинала (в данном случае, норвежском) в качестве основы (*tertium comparationis*) для сравнения конструкций на языках перевода, поскольку во всех случаях переводчики стремятся транслировать значение одной и той же оригинальной конструкции.

Автор проводит различие между семью возможными типами значения отношения «между». Оно может характеризовать некоторую *локацию*, некоторую часть пути при *движении*, использоваться при обозначении *размера* чего-либо или для спецификации отрезка *времени*. Кроме этого, оно может определять *взаимоотношения* или *взаимодействие* между некоторыми объектами или присутствие некоторого внешнего наблюдателя, осуществляющего *сопоставление* объектов.

Всего в корпусе было выделено около 400 случаев употребления *mellom*, при этом в 56% случаев оно одновременно переводилось на английский и французский с помощью предлогов *between* и *entre*. Из этого автор заключает, что *between* и *entre* вместе покрывают около 56% семантического поля отношения «между»¹. Важно отметить, что данный результат было бы невозможно получить без использования многоязычного корпуса. Предположим, что при анализе англо-французского корпуса мы бы увидели, что *between* переводится с помощью *entre* в $x\%$ случаев, а при анализе франко-английского корпуса увидели бы, что *entre* переводится как *between* в $y\%$ случаев — эти цифры не дали бы нам возможности оценить степень их действительного семантического пересечения.

Аналогичным образом автор анализирует области семантического покрытия и степени пересечения для других английских и французских предлогов и прочих конструкций. В конечном счете исследование показало значительную схожесть в кодировании отношения «между» в английском и французском языке. В большинстве случаев в обоих языках используются предложные группы со стандартными предлогами *between/entre*, а использование альтернативных предлогов наблюдается относительно редко, за исключением кодирования пространственных смыслов (локация и движение). Кроме этого, беспредложные конструкции значительно чаще используются для кодирования отношения «между» во французском языке, чем в английском.

В работе [23] многоязычный корпус используется для проверки и дополнения результатов, полученных ранее с использованиемmonoязычных корпусов. Исследуется семантика английских «эссенциальных» наречий *basically*, *essentially* и *fundamentally* в зеркале их переводов на голландский и французский языки. Использованный в этом исследовании корпус относительно невелик, поэтому полученные результаты надо рассматривать с осторожностью, однако автор считает,

¹Кроме этого *between* и *entre* независимо друг от друга покрывают еще соответственно 23% и 18% данного семантического поля.

что полученных данных достаточно для решения главной поставленной задачи, т. е. верификации ранее полученных результатов.

В работе [24] исследуется лексический профиль шведского языка в сравнении с другими языками (английским, французским, немецким, финским, норвежским, датским, исландским и голландским) на примере глаголов движения в транспорте. Сходство или различие лексических профилей языков может рассматриваться в разных плоскостях. Например, применительно к глаголам движения языки могут отличаться: самими наборами глаголов движения; по степени обязательности использования конкретного глагола для выражения определенного типа движения; по степени расширяемости семантики отдельных глаголов. Кроме этого, во многих языках даже при наличии точного семантического эквивалента часто может отдаваться предпочтение глаголам с более общими или более частными значениями.

В многоязычном корпусе были выделены шведские глаголы движения в транспорте *åka*, *fara* и *köra*, затем была собрана статистика по способам их перевода на различные языки, после чего полученные данные были проанализированы на качественном уровне. В результате была построена таблица стандартных соответствий глаголов движения на транспорте для всех рассматриваемых языков. Из нее, в частности, видно, что из числа рассматриваемых языков только в шведском существует глагол, использующийся исключительно для описания движения в качестве пассажира транспортного средства *åka* (и его менее частотный синоним *fara*).

4.4 Поливариантные параллельные корпуса

Поливариантный параллельный корпус представляет собой собрание текстов на языке оригинала, выровненных с несколькими вариантами перевода на один и тот же другой язык. Поливариантные корпуса на сегодняшний день представляют собой относительно слабо развитое направление в корпусной лингвистике. Существует поливариантный русско-немецкий корпус, созданный в Австрийской академии наук на материале выполненных в разное время переводов романа Достоевского «Идиот» [6], но он не находится в открытом доступе. Кроме этого, в русско-французском параллельном корпусе НКРЯ несколько текстов имеют от двух до четырех вариантов перевода. Соответственно, очень невелико и число собственно контрастивных лингвистических исследований, выполненных на базе таких корпусов. Между тем потенциально поливариантные корпуса открывают новые перспективы для контрастивных исследований. Например, анализ переводов, выполненных в разное время, дает возможность исследовать диахронические изменения языка перевода. Кроме этого, сравнительный анализ переводов позволяет исследовать проблему «трудностей перевода», которые возникают, в частности, при переводе культурно-специфичной лексики и прочих лингвоспецифичных языковых единиц [5, 6].

5 «Надкорпусные» базы данных

При анализе корпусного языкового материала исследователи извлекают из корпусов нужную им для лингвистических исследований информацию и могут сохранять ее. Например, после выполнения поискового запроса в НКРЯ пользователь может сохранить несколько найденных результатов в одном из трех форматов: Excel, OpenOffice Calc или XML (<http://www.ruscorpora.ru/search-main.html>). Однако найденная в корпусе информация может иметь достаточно сложную структуру, при этом ее объем может оказаться слишком большим, чтобы впоследствии можно было бы легко находить нужные примеры или получать количественные данные по встречаемости примеров различных типов. Таким образом, для хранения и обработки извлеченной из корпуса информации часто необходимо использовать отдельную БД: либо независимую, либо представляющую собой «надстройку» над структурой корпуса.

В работе [1] рассматривались специализированные ТБД, позволяющие сохранять структурированную информацию об отдельных экземплярах рассматриваемых языковых явлений (см., например, [25]). Однако ТБД не позволяют делать обобщенных статистически обоснованных выводов о свойствах текстов или корпусов, из которых они были извлечены, поскольку они извлекались не посредством последовательной обработки всех текстов корпуса, а посредством целенаправленной выборки отдельных интересующих исследователей примеров. Такой подход вполне оправдан, когда перед создателями ТБД стоит задача проиллюстрировать те или иные языковые явления примерами из корпуса. Однако часто требуется не только найти отдельные примеры, но и оценить уровень частотности определенных языковых явлений в некоторой совокупности текстов корпуса или в корпусе в целом. В такой ситуации возникает необходимость в разработке специализированной технологии, позволяющей *последовательно обрабатывать все полные тексты корпусов* (или подкорпусов) и фиксировать в отдельной БД *каждое появление* исследуемого языкового явления. Можно сказать, что такая БД является в некотором роде продолжением корпуса или «надстройкой» над ним. Ввиду отсутствия устоявшегося термина, в рамках данной работы для них вводится термин **«надкорпусные» БД**.

В идеальном случае надкорпусные БД могли бы встраиваться непосредственно в инфраструктуру существующих корпусов, что позволило бы сделать их доступными для широкого круга пользователей этих корпусов, но они могут разрабатываться и независимо. Последний подход целесообразен на текущем этапе, когда методология создания надкорпусных БД проходит опробование в ряде лингвистических проектов [26–28]. Далее будут рассмотрены первые опыты по созданию надкорпусных БД.

В рамках проекта, представленного в работе [29], проводился анализ переводных соответствий сложносоставных слов в публицистическом дискурсе. Автор работы подчеркивает, что, несмотря на то что многие современные корпуса имеют широкие поисковые возможности, их часто оказывается недостаточно для

проведения лингвистических исследований. В частности, на момент выполнения работы [29] НКРЯ не позволял задавать параметры для поиска сложных слов. В результате автор пришел к выводу о необходимости создания собственного исследовательского массива параллельных текстов современной публицистики, который был им самостоятельно выровнен и в котором были выявлены английские сложносоставные слова и их русские переводные соответствия. При этом часть операций была автоматизирована, а часть выполнялась вручную¹.

На основе массива параллельных текстов была построена надкорпусная БД, в которую записывались переводные соответствия, полученные в результате обработки выровненных текстов. Было выделено 209 английских сложносоставных слов, принадлежащих к различным частям речи и имеющих различную внутреннюю структуру. Всего было выделено более 20 видов структуры английских сложносоставных слов, наиболее распространенными из которых являются *noun + noun, adjective + noun, noun + verb и adjective + adjective*. Соответствующие конструкции в русском языке также были разбиты по частям речи и по виду их внутренней структуры (если в переводе также использовались сложносоставные слова).

В работах [26–28] описан проект по исследованию глагольных форм русского языка в зеркале их переводов на французский язык. Исполнители проекта также пришли к необходимости создания надкорпусной БД, расширяющей функции, доступные в обычных параллельных корпусах, в данном случае НКРЯ. Основным логическим элементом этой БД является переводное соответствие, т. е. кортеж, объединяющий глагольную конструкцию оригинала с ее функционально эквивалентным фрагментом в тексте перевода². При этом каждая глагольная конструкция соотносится с некоторым базовым видом из типологии (системы) видовременных форм глагола в русском языке и может специфицироваться рядом дополнительных признаков (см. http://a179.ipi.ac.ru/corpora_dynasty/main.aspx).

Описанная БД включает в себя около 5 тыс. переводных соответствий, кроме этого она оснащена двуязычным лексико-грамматическим поисковым интерфейсом. Данный интерфейс позволяет искать соответствия интересующих пользователя типов, задавая различные сочетания грамматических признаков и/или лексики для русских глагольных конструкций и соответствующих им функционально эквивалентных фрагментов, а также получать информацию о частотности этих типов (подробнее о назначении, функциях и структуре данной надкорпусной БД см. работы [26–28]).

Разработанная технология формирования надкорпусных БД легко адаптируется для исследования разноплановых лингвистических явлений. Помимо

¹ Во многих случаях при анализе параллельных текстов невозможно обойтись без ручных процедур, для выполнения которых приходится привлекать экспертов, свободно владеющих обоими языками.

² В работах [26–28] для обозначения описанного переводного соответствия используется термин *моноэквиваленция* (термин *полиэквиваленция* используется для обозначения более сложной структуры, включающей в себя более одного варианта перевода исходной конструкции).

описанного выше проекта по исследованию глагольных форм сегодня она уже используется для контрастивного анализа лингвоспецифичных языковых единиц и коннекторов.

6 Заключение

В данной работе, а также в работе [1], продолжением которой она является, было описано несколько категорий информационных ресурсов для поддержки контрастивных лингвистических исследований. В работе [1] были рассмотрены ТБД, которые можно разделить на ТБД широкого профиля и специализированные ТБД. В данной работе были рассмотрены электронные корпуса нескольких видов: сопоставимые, параллельные, двусторонние, многоязычные и поливариантные.

Было введено новое понятие — «надкорпусные» БД, представляющие собой надстройки над инфраструктурой параллельных корпусов. При обработке данных параллельных корпусов надкорпусные БД позволяют сохранять информацию о результатах контрастивного лингвистического анализа в виде формализованных описаний соответствий конструкций оригинального текста их функционально эквивалентным фрагментам в одном или нескольких переводных текстах. Данные описания формируются лингвистами-экспертами в результате последовательной обработки текстов параллельных корпусов.

Были даны примеры использования надкорпусных БД при проведении контрастивных исследований, а также выделены основные элементы сходства и различия для функционально и структурно близких БД и корпусов. В частности, было отмечено, что, несмотря на некоторое сходство специализированных ТБД и надкорпусных БД (и те и другие содержат примеры исследуемых конструкций или ссылки на них), принципиальное отличие между ними состоит в том, что в специализированных ТБД примеры специально подбираются, чтобы проиллюстрировать парадигмы рассматриваемых языковых явлений, в то время как надкорпусные БД содержат в себе *все* экземпляры исследуемых языковых явлений вместе с их переводными эквивалентами. При этом данные в надкорпусных БД генерируются посредством последовательной обработки параллельных текстов, а потому на их основе можно делать статистически обоснованные выводы и обобщения.

Последовательный анализ языковых объектов определенных категорий или видов в корпусе — всегда трудоемкий процесс, поэтому возможность сохранить результаты этой работы в отдельной БД имеет особую ценность. Возможность просматривать сохраненные переводные соответствия в различных разрезах и аспектах, делая срезы по различным грамматическим признакам, типам конструкций и / или лексическим единицам, позволяет исследователям проверять свои гипотезы на основе всего массива обработанных данных, а также выявлять и описывать языковые явления, которые не были ими замечены при выборочной обработке отдельных фрагментов корпуса.

Кроме этого, в тех случаях, когда задачей обработки корпуса одновременно занимается несколько экспертов-лингвистов, что неизбежно при проведении крупных проектов, надкорпусная БД обеспечивает возможность интегрировать плоды их совместной работы, не говоря уже о возможности предоставить другим исследователям доступ и к полученным результатам, и ко всем использованным исходным данным, что значительно упрощает процессы верификации полученных результатов и позволяет многократно использовать созданный информационный ресурс в дальнейших исследованиях.

Литература

1. Кружков М. Г. Информационные ресурсы контрастивных лингвистических исследований: типологические базы данных // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 1. С. 198–212.
2. Гак В. Г. О контрастивной лингвистике // Новое в зарубежной лингвистике. Вып. XXV. Контрастивная лингвистика. — М.: Прогресс, 1989. С. 5–17.
3. Добровольский Д. О., Кретов А. А., Шаров С. А. Корпус параллельных текстов // Научная и техническая информация. Сер. 2. Информационные процессы и системы, 2005. № 6. С. 16–27.
4. Добровольский Д. О., Кретов А. А., Шаров С. А. Корпус параллельных текстов: архитектура и возможности использования // Национальный корпус русского языка: 2003–2005. — М.: Индрик, 2005. С. 263–296.
5. Андреева Е. Г., Касевич В. Б. Грамматика и лексика (на материале англо-русского корпуса параллельных текстов) // Национальный корпус русского языка: 2003–2005. — М.: Индрик, 2005. С. 297–307.
6. Добровольский Д. О. Корпус параллельных текстов в исследовании культурно-специфичной лексики // Национальный корпус русского языка: 2006–2008. Новые результаты и перспективы. — СПб.: Нестор-История, 2009. С. 383–401.
7. Stubbs M. Words and phrases: Corpus studies of lexical semantics. — Oxford: Blackwell, 2002. 287 p.
8. Национальный корпус русского языка. <http://www.ruscorpora.ru/index.html>.
9. Johansson S. Seeing through multilingual corpora. On the use of corpora in contrastive studies // Studies in Corpus Linguistics. — Amsterdam: Benjamins, 2007. Vol. 26. 378 p.
10. Stenström A.-B. Youngspeak: Spanish vale and English okay // Advances in corpus-based contrastive linguistics. — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 127–137.
11. De Cock S., Goossens D. Quantity approximation in English and French business news reporting // Advances in corpus-based contrastive linguistics. — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 139–155.
12. Lavid J., Arús J., Morató L. Thematic variation in English and Spanish newspaper genres // Advances in corpus-based contrastive linguistics. — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 261–286.
13. Toury G. Descriptive translation studies and beyond. — Amsterdam: Benjamins, 1995. 311 p.

14. *Capelle B.* Show me your translation and I'll tell you what source language it comes from: Motion verbs in English translated from French vs. German // *Societas Linguistica Europaea, SLE 2011 — 44th Annual Meeting: Book of Abstracts.* — Logroño: Universidad de La Rioja, 2011. P. 53–54.
15. *Rabadan R., Izquierdo M.* A corpus-based analysis of English affixal negation translated into Spanish // *Advances in corpus-based contrastive linguistics.* — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 57–82.
16. *Øverås L.* In search of the third code: An investigation of norms in literary translation // *Meta*, 1998. Vol. 43. No. 4. P. 557–570.
17. *Beeching K.* A parallel corpus approach to investigating semantic change // *Advances in corpus-based contrastive linguistics.* — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 103–125.
18. *Aijmer K., Foolen A., Simon-Vandenbergen A.-M.* Pragmatic markers in translation: A methodological proposal // *Approaches to discourse particles.* — Amsterdam: Elsevier, 2006. P. 101–114.
19. *Ebeling J., Ebeling S. O., Hasselgård H.* Using recurrent word-combinations to explore cross-linguistic differences // *Advances in corpus-based contrastive linguistics.* — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 177–199.
20. *Herriman J.* The extraposition of clausal subjects in English and Swedish // *Advances in corpus-based contrastive linguistics.* — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 233–259.
21. *Egan T.* Tertia comparationis in multilingual corpora // *Advances in corpus-based contrastive linguistics.* — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 7–24.
22. *Krzeszowski T. P.* Contrasting languages: The scope of contrastive linguistics. — Berlin: Mouton de Gruyter, 1990. 286 p.
23. *Simon-Vandenbergen A. M.* English adverbs of essence and their equivalents in Dutch and French // *Advances in corpus-based contrastive linguistics.* — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 83–102.
24. *Viberg Å.* Seeing the lexical profile of Swedish through multilingual corpora // *Advances in corpus-based contrastive linguistics.* — Amsterdam: Benjamins, 2013. P. 25–56.
25. *Brown D. P., Tiberius C., Chumakina M., Corbett G. G., Krasovitsky A.* Databases designed for investigating specific phenomena // *The use of databases in cross-linguistic studies. Empirical approaches to language typology.* — Berlin–New York: Mouton De Gruyter, 2009. Vol. 41. P. 117–154.
26. *Бунтман Н. В., Зализняк А. А., Зацман И. М., Кружков М. Г., Лощилова Е. Ю., Сичинава Д. В.* Информационные технологии корпусных исследований: Принципы построения кросслингвистических баз данных // *Информатика и её применения*, 2014. Т. 8. Вып. 2. С. 98–110.
27. *Zatsman I., Buntman N., Krushkov M., Nuriev V., Zalizniak A. A.* Conceptual framework for development of computer technology supporting cross-linguistic knowledge discovery // 15th Conference (European) on Knowledge Management Proceedings. — Reading, MA, USA: Academic Publishing International, 2014. P. 1063–1071.
28. *Krushkov M. G., Buntman N. V., Loshchilova E. Ju., Sitchinava D. V., Zalizniak A. A., Zatsman I. M.* A database of Russian verbal forms and their French translation equivalents // *Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии*, 2014. Вып. 13(20). С. 284–297.

29. Мамонтова В. В. Корпус параллельных текстов и база данных как инструменты исследования переводческих соответствий // Вестник Пятигорского государственного лингвистического ун-та, 2008. № 3. С. 124–127.

Поступила в редакцию 05.03.15

INFORMATION RESOURCES FOR CONTRASTIVE STUDIES: ELECTRONIC TEXT CORPORA

M. G. Kruzhkov

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

Abstract: This article presents information resources used in contrastive linguistic studies and their principle features. There are two main types of such information resources: typological databases and electronic text corpora. This paper is focused on the latter. There are two types of corpora, which are particularly relevant for contrastive studies: comparable corpora — balanced collections of original texts in the languages compared and parallel (translation) corpora — collections of original texts in one of the compared languages aligned with their translations into other compared language(s). In addition to description of the existing information resources of contrastive linguistic studies, this paper introduces a new type of such resources, which are termed here as corpus extension databases. The article outlines features of such databases in comparison to electronic corpora and justifies the necessity for creating them.

Keywords: linguistic studies; databases; typological databases; comparable corpora; parallel corpora; corpus extension databases

DOI: 10.14357/08696527150209

Acknowledgments

The work was performed with financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 13-06-00403).

References

1. Kruzhkov, M. G. 2015. Информационные ресурсы контрастивных лингвистических исследований: типологические базы данных [Information resources for contrastive studies: Typological Databases]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(1):198–212.
2. Gak, V. G. 1989. О контрастивной лингвистике [On contrastive linguistics]. *Novoe v zarubezhnoy lingvistike. Vyp. XXV. Kontrastivnaya lingvistika* [New developments in foreign linguistics. Vol. XXV. Contrastive linguistics]. Moscow: Progress. 5–17.

3. Dobrovolskiy, D. O., A. A. Kretov, and S. A. Sharov. 2005. Korpus parallel'nykh tekstov [Corpus of parallel texts]. *Nauchnaya i Tekhnicheskaya Informatsiya* [Scientific and Technical Information]. Ser. 2: Informatsionnye protsessy i sistemy [Informational processes and systems]. 6:16–27.
4. Dobrovolskiy, D. O., A. A. Kretov, and S. A. Sharov. 2005. Korpus parallel'nykh tekstov: Arkhitektura i vozmozhnosti ispol'zovaniya [Corpus of parallel texts: Architecture and applications] *Natsional'nyy korpus russkogo yazyka: 2003–2005* [Russian National Corpus: 2003–2005]. Moscow: Indrik. 263–296.
5. Andreeva, E. G., and V. B. Kasevich. 2005. Grammatika i leksika (na materiale anglo-russkogo korpusa parallel'nykh tekstov) [Grammar and lexis (based on the English-Russian parallel corpus)]. *Natsional'nyy korpus russkogo yazyka: 2003–2005* [Russian National Corpus: 2003–2005]. Moscow: Indrik. 297–307.
6. Dobrovolskiy, D. O. 2009. Korpus parallel'nykh tekstov v issledovanii kul'turno-spetsifichnoy leksiki [Using a parallel corpus for investigation of culture-specific lexis] *Natsional'nyy korpus russkogo yazyka: 2006–2008. Novye rezul'taty i perspektivy* [Russian National Corpus: 2006–2008. New results and prospects]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya. 383–401.
7. Stubbs, M. 2002. *Words and phrases: Corpus studies of lexical semantics*. Oxford: Blackwell. 287 p.
8. Natsional'nyy korpus russkogo yazyka [Russian National Corpus]. Available at: <http://www.ruscorpora.ru/index.html> (accessed March 5, 2015).
9. Johansson, S. 2007. Seeing through multilingual corpora. On the use of corpora in contrastive studies. *Studies in corpus linguistics*. Amsterdam: Benjamins. Vol. 26. 378 p.
10. Stenström A.-B. 2013. Youngspeak: Spanish vale and English okay. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 127–137.
11. De Cock, S., and D. Goossens. 2013. Quantity approximation in English and French business news reporting. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 139–155.
12. Lavid, J., J. Arús, and L. Moratón. 2013. Thematic variation in English and Spanish newspaper genres. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 261–286.
13. Toury, G. 1995. *Descriptive translation studies and beyond*. Amsterdam: Benjamins. 311 p.
14. Capelle, B. 2011. Show me your translation and I'll tell you what source language it comes from: Motion verbs in English translated from French vs. German. *Societas Linguistica Europaea 44th Annual Meeting in Logrono: Book of Abstracts*. Logroño: Universidad de La Rioja. 53–54.
15. Rabadan, R., and M. Izquierdo. 2013. A corpus-based analysis of English affixal negation translated into Spanish. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 57–82.
16. Øverås, L. 1998. In search of the third code: An investigation of norms in literary translation. *Meta* 43(4):557–570.
17. Beeching, K. 2013. A parallel corpus approach to investigating semantic change. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 103–125.

18. Aijmer, K., A. Foolen, and A.-M. Simon-Vandenbergen. 2006. Pragmatic markers in translation: A methodological proposal. *Approaches to discourse particles*. Amsterdam: Elsevier. 101–114.
19. Ebeling, J., S. O. Ebeling, and H. Hasselgård. 2013. Using recurrent word-combinations to explore cross-linguistic differences. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 177–199.
20. Herriman, J. 2013. The extraposition of clausal subjects in English and Swedish. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 233–259.
21. Egan, T. 2013. Tertia comparationis in multilingual corpora. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 7–24.
22. Krzeszowski, T. P. 1990. *Contrasting languages: The scope of contrastive linguistics*. Berlin: Mouton de Gruyter, 1990. 286 p.
23. Simon-Vandenbergen, A. M. 2013. English adverbs of essence and their equivalents in Dutch and French. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 83–102.
24. Viberg, Å. 2013. Seeing the lexical profile of Swedish through multilingual corpora. *Advances in corpus-based contrastive linguistics*. Amsterdam: Benjamins. 25–56.
25. Brown, D. P., C. Tiberius, M. Chumakina, G. G. Corbett, and A. Krasovitsky. 2009. Databases designed for investigating specific phenomena. *The use of databases in cross-linguistic studies. Empirical approaches to language typology*. Berlin–New York: Mouton De Gruyter. 41:117–154.
26. Buntman, N. V., A. A. Zaliznyak, I. M. Zatsman, M. G. Kruzhkov, E. Yu. Loshchilova, and D. V. Sichinava. 2014. Informatsionnye tekhnologii korpusnykh issledovaniy: Printsy postroeniya krosslingvisticheskikh baz dannykh [Information technologies for corpus studies: Underpinnings for cross-linguistic database creation]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(2):98–110.
27. Zatsman, I., N. Buntman, M. Kruzhkov, V. Nuriev, and A. A. Zalizniak. 2014. Conceptual framework for development of computer technology supporting cross-linguistic knowledge discovery. *15th Conference (European) on Knowledge Management Proceedings*. Reading, MA: Academic Publishing International. 1063–1071.
28. Kruzhkov, M. G., N. V. Buntman, E. Ju. Loshchilova, D. V. Sitchinava, A. A. Zalizniak, and I. M. Zatsman. 2014. A database of Russian verbal forms and their French translation equivalents. *Komp'yuternaya Lingvistika i Intellektual'nye Tekhnologii* [Computer Linguistics and Intellectual Technologies] 13(20):284–297.
29. Mamontova, V. V. 2008. Korpus parallel'nykh tekstov i baza dannykh kak instrumenty issledovaniya perevodcheskikh sootvetstviy [Parallel corpus and database as tools for investigating translation correspondences]. *Vestnik Pyatigorskogo Gosudarstvennogo Linguisticheskogo Un-ta* [Newsletter of Pyatigorsk State Linguistic University] 3:124–127.

Received March 05, 2015

Contributor

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

К 80-ЛЕТИЮ ЗАСЛУЖЕННОГО ДЕЯТЕЛЯ НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ К. К. КОЛИНА

*И. А. Соколов¹, С. Н. Гринченко², А. А. Зацаринный³, И. М. Зацман⁴,
П. Г. Сибиряков⁵*



Константин Константинович Колин, доктор технических наук, профессор — известный ученый в области философских проблем науки и образования, информатики и создания сложных автоматизированных систем управления. Он автор более 500 печатных научных работ, 15 монографий, ряда новых учебных программ и пособий для вузов. Имеет большой опыт научной работы в оборонно-промышленном комплексе СССР и Российской академии наук.

К. К. Колин родился 28 мая 1935 г. в г. Фергане. Высшее образование получил в Ленинградской военно-воздушной инженерной академии им. А. Ф. Можайского, которую окончил в 1959 г. по специальности инженера по радиооборудованию Военно-

Воздушных Сил. По окончании академии был прикомандирован (с оставлением на военной службе) к Министерству радиопромышленности СССР для выполнения работ по созданию автоматизированной системы управления войсками ПВО страны.

В период с 1960 по 1971 гг. работал в НИИ приборной автоматики Минрадиопрома, где прошел путь от младшего научного сотрудника до начальника научной лаборатории — заместителя начальника отдела разработки алгоритмов АСУ ПВО страны. Здесь им была разработана и испытана на полигоне Капустин

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

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

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

⁴Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, iz.ipi@a170.ipi.asc.ru

⁵Аналитический центр стратегических исследований «СОКОЛ», pasibir@yandex.ru

Яр первая отечественная операционная система управляющего вычислительного комплекса АСУ ПВО, работающего в реальном масштабе времени. В этой системе была реализована оригинальная концепция управления мультипрограммным вычислительным процессом с использованием многоуровневой системы прерывания, а также новые принципы программного обеспечения устойчивости работы комплекса к сбоям и отказам оборудования.

Результаты этих работ стали основой для защиты кандидатской (1967 г.) и докторской (1978 г.) диссертаций К. К. Колина, а также для двух монографий¹, которые известны специалистам не только в нашей стране, но и за рубежом. Последняя из них стала основой разработанной К. К. Колиным теории организации вычислительного процесса в системах реального времени и была переведена и издана в Болгарии и Польше². Одна из первых в те годы работ по теории организации вычислительного процесса в системах реального времени была опубликована К. К. Колиным в США.

В 1971 г. по указанию Оборонного отдела ЦК КПСС К. К. Колин был переведен в НИИ автоматической аппаратуры (сегодня — АО НИИ АА имени академика В. С. Семенихина) для выполнения работ по созданию Информационно-вычислительного центра ЦК КПСС. Главным конструктором этого Центра был назначен академик В. С. Семенихин, а научным руководителем проекта — академик В. М. Глушков. Создание и ввод в эксплуатацию этого Центра стали важными событиями в области использования средств автоматизации в высших органах государственной власти нашей страны.

В НИИ автоматической аппаратуры К. К. Колин прошел путь от начальника системного научно-тематического отдела до начальника комплексного научно-исследовательского отделения. В этот период под руководством Генерального конструктора академика В. С. Семенихина и его заместителя члена-корреспондента АН СССР И. А. Мизина им были выполнены системотехнические разработки ряда проектов по созданию сложных информационно-вычислительных систем оборонного назначения. За эти разработки и их внедрение он был награжден орденом «Знак Почета». Научным результатом этих работ стала одна из первых отечественных монографий в области методологии создания информационно-вычислительных систем, написанная в соавторстве с К. Н. Евсюковым³.

В 1984 г. К. К. Колин был назначен генеральным директором Центрального научно-производственного объединения «ЭКОР» (Экономика и организация радиопромышленности) Министерства радиопромышленности СССР, основной

¹Колин К. К., Липаев В. В. Проектирование алгоритмов управляющих ЦВМ. — М.: Советское радио, 1970. 344 с.; Липаев В. В., Колин К. К., Серебровский А. А. Математическое обеспечение управляющих ЦВМ. — М.: Советское радио, 1972. 528 с.

²Колин К. Математическо осигуряване на управляващи ЦИМ. — София: Техника, 1974. 548 с.; Lipaev W. W., Kolin K. K. Oprogramowanie podstawowe maszyn cyfrowych. — Warshawa: Państwowe wydawnictwo naukowe, 1975. Biblioteka informatiki ser. 388 p.

³Евсюков К. Н., Колин К. К. Проектирование информационно-вычислительных систем. — М.: Статистика, 1977. 214 с.

задачей которого являлась комплексная информатизация отрасли. В состав этого объединения входили:

- НИИ экономики и информации радиопромышленности (НИИЭИР);
- Научно-исследовательский центр систем управления;
- Специальное конструкторское бюро «Орградиопром»;
- Центр научной организации труда;
- Информационно-вычислительный центр Минрадиопрома СССР.

В этот период в стране были развернуты работы по комплексной информатизации оборонных отраслей промышленности, которые осуществлялись под контролем Военно-промышленной комиссии (ВПК) при Совете Министров СССР. Головным министерством в этих работах был Минрадиопром, который осуществлял координацию работ в других оборонных отраслях. Поэтому решением ВПК К. К. Колин был назначен не только Главным конструктором отраслевой АСУ Минрадиопрома, но также и председателем Совета главных конструкторов АСУ девяти оборонных отраслей промышленности. Здесь ему пригодился опыт создания сложных автоматизированных систем военного назначения. Используя этот опыт, он предложил и реализовал методологию проектирования отраслевых АСУ, основанную на типовых проектных решениях создания комплексов автоматизации, а также на тех принципах поэтапного их ввода в эксплуатацию, которые сегодня известны как «технология создания открытых систем». За эти работы ему было присвоено почетное звание «Заслуженный радиотехник СССР».

В этот же период времени К. К. Колин начал развивать научное сотрудничество специалистов оборонных отраслей промышленности с учеными Академии наук СССР. Примером может служить разработка Автоматизированной диалоговой системы комплексного планирования «Гранит», которая осуществлялась совместно со специалистами Вычислительного центра АН СССР (научные руководители проекта — академик Г. С. Поспелов и генеральный директор ЦНПО «ЭКОР» д.т.н. К. К. Колин). Эта система была основана на использовании методов программно-целевого управления и искусственного интеллекта и предназначалась для формирования в диалоговом режиме планов развития оборонных отраслей промышленности, сбалансированных по материальным, трудовым и финансовым ресурсам. Она позволила существенным образом сократить сроки формирования этих планов, повысить их эффективность, а также получить значительную экономию финансовых и материальных ресурсов за счет более рационального планирования закупок комплектующих изделий в системе материально-технического снабжения оборонных отраслей промышленности.

Для реализации этого важного инновационного проекта в составе ЦНПО «ЭКОР» было создано специальное тематическое отделение, которое возглавил сотрудник ВЦ АН СССР д.т.н. В. М. Соловьев.

С 1989 г. Константин Константинович работает в Институте проблем информатики РАН. В течение 10 лет он был заместителем директора по научной

работе, исполняя при этом также и обязанности главного инженера института. За это время он много сделал для развития института, создания и укрепления его материально-технической базы, оснащения научных подразделений необходимой вычислительной техникой, для организации научной и редакционно-издательской деятельности, подготовки научных кадров.

В настоящее время свои научные исследования он сосредоточил главным образом в области изучения философских и гуманитарных проблем информатизации общества и связанных с этим научно-методологических аспектов развития информатики. Основным результатом этих работ стало формирование современных представлений об информатике как о фундаментальной науке и комплексной научной проблеме. В работах К. К. Колина показано, что в последние годы информатика быстро развивается и становится ядром новой перспективной научной отрасли — «информационные науки». Результаты этих исследований известны специалистам как в нашей стране, так и за рубежом. Его монографии по проблемам социальной информатики¹ имеют высокий уровень цитирования, а монография «Философские проблемы информатики»² переведена на китайский язык и издана в 2012 г. в Китае³. В настоящее время эта монография переиздается в России на английском языке.

За научные результаты в области исследования проблем философии информации К. К. Колин в 2010 г. был избран Президентом Международного общества по изучению информации (Вена, Австрия), а в 2011 г. — членом Академического Совета Международного исследовательского центра философии информации (г. Сиань, Китай).

По его инициативе в 2008 г. в составе Сибирского федерального университета совместно с рядом институтов РАН создан Ведущий научно-образовательный центр «Информатика, информационные технологии и управление», а в 2010 г. — Научно-образовательный центр «Информационное общество» в составе Челябинской государственной академии культуры и искусств. К. К. Колин назначен научным руководителем этого Центра и избран почетным профессором Академии.

В последние годы К. К. Колин работает над формированием двух новых направлений научных исследований — *информационной культурологии*⁴ и *информационной антропологии*. Он считает, что первое из них должно стать

¹Колин К. К. Фундаментальные основы информатики: Социальная информатика: Учебное пособие для вузов. — М.: Академический Проект, 2000. 350 с.; Колин К. К. Социальная информатика: Учебное пособие для вузов. — М.: Академический Проект, 2003. 432 с.

²Колин К. К. Философские проблемы информатики. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 264 с.

³Kolin K. Philosophical problems in information sciences. — Beijing: China Social Sciences Press, 2012. 288 p.

⁴Колин К. К., Урсул А. Д. Информационная культурология: предмет и задачи нового научного направления. — Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 249 р.; Колин К. К., Урсул А. Д. Информация и культура: введение в информационную культурологию. — М.: Стратегические приоритеты, 2015. 300 с.

научной базой для развития новой информационной культуры общества, а второе — основой информационной концепции познания природы человека¹.

Важное место в научной деятельности К. К. Колина занимают междисциплинарные исследования проблем национальной и глобальной безопасности², в особенности их гуманитарные и информационные аспекты³. Эти исследования он проводит в качестве научного руководителя Аналитического центра стратегических исследований «СОКОЛ» и заместителя главного редактора международного научно-аналитического журнала «Стратегические приоритеты». Публикации в этом журнале осуществляются на русском, английском и китайском языках.

Значительное внимание К. К. Колин уделяет подготовке научных кадров. Более 25 лет он является заместителем председателя диссертационного совета при Институте проблем информатики РАН, а в настоящее время — также и научным консультантом трех соискателей ученой степени доктора наук.

Он входит в состав редколлегий и редакционных советов ряда научных и научно-образовательных журналов России и других стран (Болгарии и Швейцарии). В двух из этих журналов («Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств» и «Вестник Челябинской государственной академии культуры и искусств») он является председателем редакционного совета.

За научные заслуги К. К. Колин избран членом ряда российских и международных общественных академий наук и научных организаций. В 2005 г. решением Президиума Российской академии естественных наук он награжден серебряной медалью им. академика П. Л. Капицы, а Указом Президента России ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

В настоящее время Константин Константинович активно продолжает свою научную и общественную деятельность. Он является научным руководителем научно-исследовательских работ, выполняемых в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук, готовит к печати очередную монографию, выступает с докладами на российских и зарубежных конференциях, консультирует молодых ученых.

Авторы желают ему здоровья и дальнейших творческих успехов.

Поступила в редакцию 06.04.15

¹Колин К. К. Информационная антропология: предмет и задачи нового направления в науке и образовании // Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств, 2011. № 17. С. 17–32.

²Колин К. К. Глобальные угрозы развитию цивилизации в XXI веке // Стратегические приоритеты, 2014. № 1. С. 6–30.

³Колин К. К. Системный кризис культуры: структура и содержание проблемы // Стратегические приоритеты, 2014. № 3. С. 6–27.

ОБ АВТОРАХ

Белоусов Василий Владимирович (р. 1977) — кандидат технических наук, заведующий сектором проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Босов Алексей Вячеславович (р. 1969) — доктор технических наук, заведующий сектором проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Гресс Екатерина Сергеевна (р. 1990) — аспирантка Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Гринченко Сергей Николаевич (р. 1946) — доктор технических наук, профессор, главный 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

Зацман Игорь Моисеевич (р. 1946) — доктор технических наук, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Ильин Александр Владимирович (р. 1975) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Карнаков Виктор Владимирович (р. 1947) — главный научный сотрудник Центра информационных технологий в проектировании Российской академии наук

Карпухин Евгений Олегович (р. 1987) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра информационных технологий в проектировании Российской академии наук

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 ФГАОУ ВПО «Российский государ-

ственний университет 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

Кружков Михаил Григорьевич (р. 1975) — ведущий программист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кузнецов Владислав Владимирович (р. 1988) — кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Леонтьев Николай Дмитриевич (р. 1988) — аспирант кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Листопад Сергей Викторович (р. 1984) — кандидат технических наук, научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Наумов Андрей Викторович (р. 1966) — доктор физико-математических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Сергеев Игорь Викторович (р. 1965) — кандидат технических наук, заместитель директора Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Сибириakov Павел Георгиевич (р. 1934) — кандидат технических наук, старший аналитик Аналитического центра стратегических исследований «СОКОЛ»

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

Соколов Игорь Анатольевич (р. 1954) — академик Российской академии наук, доктор технических наук, директор Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Солдатов Сергей Александрович (р. 1982) — кандидат технических наук, главный инженер ООО «Лайтон»

Ушаков Владимир Георгиевич (р. 1952) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Филиппов Сергей Владимирович (р. 1984) — инженер-исследователь Центра информационных технологий в проектировании Российской академии наук

Шоргин Всеволод Сергеевич (р. 1978) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики 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 не должна нарушать закон об авторских правах.

Направляя рукопись в редакцию, авторы сохраняют все права собственников данной рукописи и при этом передают учредителям и редколлегии неисключительные права на издание статьи на русском языке (или на языке статьи, если он отличен от русского) и на ее распространение в России и за рубежом. Авторы должны предоставить в редакцию письмо в следующей форме:

Соглашение о передаче права на публикацию:

«Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи «...», передаем учредителям и редколлегии журнала «Системы и средства информатики» неисключительное право опубликовать данную рукопись статьи на русском языке как в печатной, так и в электронной версиях журнала. Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает авторских прав других лиц или организаций, а также не содержит сведений, запрещенных к опубликованию в открытой печати.

Подписи авторов: (ф. и. о., дата, адрес).

Это соглашение может быть предоставлено в бумажном виде или в виде отсканированной копии (с подписями авторов).

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности публикации представленной статьи в открытой печати.

2. К статье прилагаются данные автора (авторов) (см. п. 8). При наличии нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией.
3. Редакция журнала осуществляет экспертизу присланных статей в соответствии с принятой в журнале процедурой рецензирования.

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.

4. Решение редколлегии о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей 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 20 страниц указанного формата.

Сокращения слов, помимо стандартных, не допускаются. Допускается минимальное количество аббревиатур.

Все страницы рукописи нумеруются.

Шаблоны примеров оформления представлены в Интернете:

<http://www.ipiran.ru/publications/collected/template.doc>

8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:

- название статьи;
- Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
- место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
- сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_rus/authors.asp и
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_eng/authors.asp;
- аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
- ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами.
- источники финансирования работы (ссылки на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.).

9. Требования к спискам литературы.

Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в каждом из списков литературы в порядке первых упоминаний.

Списки литературы представляются в двух вариантах:

- (1) **Список литературы к русскоязычной части.** Русские и английские работы — на языке и в алфавите оригинала.
- (2) **References.** Русские работы и работы на других языках — в латинской транслитерации с переводом на английский язык; английские работы и работы на других языках — на языке оригинала.

Необходимо для составления списка “References” пользоваться размещенной на сайте <http://www.translit.ru/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу, при этом в закладке «варианты...» следует выбрать опцию BNG.

Список литературы “References” приводится полностью отдельным блоком, повторяя все позиции из списка литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы к русскоязычной части есть ссылки на иностранные публикации, набранные латиницей, они полностью повторяются в списке “References”.

Примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”:

Описание статьи из журнала:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Описание материалов конференций:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povышeniya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonants, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Описание переводной книги (в списке литературы к русскоязычной части необходимо указать: / Пер. с англ. — после названия книги, а в конце ссылки указать оригинал книги в круглых скобках):

1. В русскоязычной части:

Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. Vibration problems in engineering. — 4th ed. — N.Y.: Wiley, 1974. 521 p.)

2. В англоязычной части:

Timoshenko, S. P., D. H. Young, and W. Weaver. 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. N.Y.: Wiley. 521 p.

Описание неопубликованного документа:

Latypov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004. Geology and production (NGT GiD). Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198. (In Russian, unpubl.)

Описание интернет-ресурса:

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov, V. I. 2003. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyy tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. D.Sc. Diss. Moscow. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki 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 20 pages of the specified format.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site:

<http://www.ipiran.ru/publication/collected/template.doc>

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_rus/authors.asp and
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_eng/authors.asp;
- abstract (not less than 100 words) both in Russian and in English. Abstract is a short summary of the article that can be published separately. The abstract is the main source of information on the article and it could be included in leading information systems and data bases. The abstract in English has to be an original text and should not be an exact translation of the Russian one. Good English is required. In abstracts, avoid references and formulae.
- Indexing is performed on the basis of keywords. The use of keywords from the internationally accepted thematic Thesauri is recommended.
Important! Keywords must not be sentences.
- Acknowledgments.

9. References. Russian references have to be presented both in English translation and in Latin transliteration (refer <http://www.translit.ru>, option BGN).

Please take into account the following examples of Russian references appearance:

Article in journal:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S10231935080077.

Journal article in electronic format:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic

exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Conference proceedings:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povышeniya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Books and other monographs:

Lindorf, L. S., and L. G. 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 semanticeskogo 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