

ИНФОРМАТИКА И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ

**Научный журнал Отделения информационных технологий
и вычислительных систем Российской академии наук**

Издается с 2007 года
Журнал выходит ежеквартально

Учредители:
Российская академия наук
Институт проблем информатики Российской академии наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

академик С. В. Емельянов (главный редактор, член Редакционного совета)
академик Ю. И. Журавлев (председатель Редакционного совета)
академик С. К. Коровин
академик Г. И. Савин
академик А. Л. Стемпковский
академик Ю. И. Шокин (член Редакционного совета)
член-корреспондент РАН В. Л. Арлазаров
член-корреспондент РАН А. Б. Жижченко
член-корреспондент РАН И. А. Каляев
член-корреспондент РАН Ю. С. Попков
член-корреспондент РАН К. В. Рудаков
член-корреспондент РАН И. А. Соколов (зам. главного редактора,
член Редакционного совета)
член-корреспондент РАН Ю. А. Флеров
член-корреспондент РАН Б. Н. Четверушкин
член-корреспондент РАН Р. М. Юсупов
профессор, д.т.н. В. И. Будзко
профессор, д.т.н. А. А. Зацаринный
профессор, д.ф.-м.н. А. В. Печинкин
профессор, д.т.н. И. Н. Сеницын
профессор, д.ф.-м.н. С. Я. Шоргин (ответственный секретарь)

Редакция

профессор, д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков
к.ф.-м.н. Е. Н. Арутюнов
О. В. Ломакина

© Институт проблем информатики Российской академии наук, 2007

Адрес редакции:

Москва 119333, ул. Вавилова 44, корп. 2, ИПИ РАН,
редакция журнала «Информатика и её применения»
Тел. 8(499)135-86-92, e-mail rust@ipiran.ru

Подписной индекс журнала в каталоге «Роспечать» 88018 (годовая подписка)

Информатика и её применения

Том 1 Выпуск 2 Год 2007

СОДЕРЖАНИЕ

Корреляционные методы построения аналитических информационных моделей флуктуаций полюса Земли по априорным данным <i>И. Н. Сеницын</i>	2
Конструирование канонических информационных моделей для интегрированных информационных систем <i>В. Н. Захаров, Л. А. Калинин, И. А. Соколов, С. А. Ступников</i>	15
Стационарные характеристики многолинейной системы массового обслуживания с одновременными отказами приборов <i>А. В. Печинкин, И. А. Соколов, В. В. Чаплыгин</i>	39
Программная инфраструктура информационного web-портала <i>А. В. Босов, А. В. Иванов</i>	50
Байесовское оценивание в системах наблюдения с марковскими скачкообразными процессами: игровой подход <i>А. В. Борисов</i>	65
Байесовский подход к анализу систем массового обслуживания и показателей надежности <i>А. А. Кудрявцев, С. Я. Шоргин</i>	76

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ФЛУКТУАЦИЙ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ ПО АПРИОРНЫМ ДАННЫМ*

И. Н. Сеницын¹

Аннотация: Методы современной статистической информатики лежат в основе исследований по фундаментальной проблеме «Статистическая динамика вращения Земли». Рассматриваются приближенные и точные корреляционные методы построения аналитических стохастических моделей с аддитивными и параметрическими гармоническими и случайными возмущениями для флуктуаций полюса Земли на интервалах времени 3–5 лет. В основу построения положены априорные данные по динамической структуре и стохастическим возмущениям деформируемой Земли. Приводятся примеры применения методов из состава информационных ресурсов «Статистическая динамика вращения Земли».

Ключевые слова: флуктуации полюса Земли; информационная аналитическая модель; априорные данные; спектрально-корреляционные характеристики; корреляционные методы; стохастические дифференциальные уравнения

1 Введение

Движение Земли относительно центра масс есть сложный многочастотный нестационарный процесс, который требует всестороннего изучения. Его исследования представляют интерес в естественно-научном фундаментальном (астрометрическом), прикладном (геофизическом) и практическом (навигационном) аспектах. Астрометрические данные высокоточных измерений (служб широт и точного времени) свидетельствуют о небесно-механической природе механизма возбуждения колебаний полюса Земли. По данным измерений международной службы вращения Земли (МСВЗ), за последние 15–20 лет выделяются следующие три основные составляющие:

- (1) чандлеровское колебание (свободная нутация), амплитуда которого достигает величин $0,20''$ – $0,25''$ в год, а период — 433 ± 2 звездных суток;
- (2) годовое колебание с амплитудой $0,07''$ – $0,08''$ в год и периодом 365,25 звездных суток;
- (3) тренд «среднего» полюса Земли со средней скоростью $0,005''$ в год.

Чандлеровская частота колебаний обусловлена аддитивным лунно-солнечным гравитационным возмущением с комбинационной (годовой и чандлеровской) частотой $N_0 \approx 5/6$ цикла в год.

Собственная частота N нутационных колебаний вязко-упругой деформируемой Земли оценивается величиной $N = 0,83 \div 0,89$. При этом разность частот $\delta_N = |N - N_0|$ сравнима с коэффициентом диссипации D , $\delta_N \sim D$. Наиболее чувствительными оказываются возмущения с частотами вблизи параметрического резонанса, т.е. в окрестности значения $2N_0$. Анализ частотных характеристик данных измерений МСВЗ, в том числе спектральной плотности мощности и потенциала момента гравитационно-приливных сил, свидетельствует о наличии возмущений с удвоенной частотой $2N_0$ [1–4].

Различным подходам по построению стохастических моделей движения полюса Земли посвящены работы [5–21]. В [8, 9, 13, 15] развита общая теория распределений флуктуаций движения Земли. Влияние стохастических параметрических шумов, происходящих от флуктуационно-диссипативных сил в рамках корреляционной теории для построения их динамических структур деформируемой Земли изучено в [10–13]. В [16–20] исследован механизм стабилизации чандлеровских колебаний полюса в условиях параметрических гармонических диссипативных и гироскопических возмущений на удвоенной чандлеровской частоте при аддитивных и параметрических стохастических возмущениях.

Рассмотрим два важных для практики класса приближенных нелинейных корреляционных

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-07-00031) и программы ОИТВС РАН «Фундаментальные основы информационных технологий и систем» (проект 1.5).

¹ Институт проблем информатики Российской академии наук, sinitsin@dol.ru

методов построения аналитических информационных стохастических моделей:

- квазилинейные методы, основанные на эквивалентной статистической линеаризации стохастических нелинейных и параметрических возмущений;
- методы параметрического корреляционного построения, основанные на нелинейных корреляционных уравнениях.

При этом, следуя [22], в силу высокой «добротности» динамической структуры деформируемой Земли будем пользоваться «укороченными» уравнениями.

2 Стохастические дифференциальные уравнения флуктуаций полюса Земли

Для случая параметрических возмущений, происходящих как от флуктуационно-диссипативных сил, так и от гироскопических сил, рассмотрим следующие стохастические дифференциальные уравнения движения полюса Земли:

$$\dot{p} + N_1 q + D_1 p = M_1, \quad (1)$$

$$\dot{q} - N_2 p + D_2 q = M_2. \quad (2)$$

Здесь p, q — информационные переменные, доступные измерениям МСВЗ, представляют собой проекции мгновенной угловой скорости вращения Земли на связанные оси ($p, q \ll r_*$, r_* — осевая угловая скорость вращения Земли, принимаемая постоянной). Если ограничиться возмущениями на частотах N_0 и $2N_0$, отвечающих главным резонансам, то выражения для коэффициентов гироскопических (N_1, N_2) и диссипативных (D_1, D_2) моментов гравитационно-приливных сил будут иметь вид

$$N_i = N \left[1 + \pi_1^{N_i} \cos(N_0 t - \chi_1^{N_i}) + \pi_2^{N_i} \cos(2N_0 t - \chi_2^{N_i}) + X^{N_i}(t) \right], \quad (3)$$

$$D_i = D \left[1 + \pi_1^{D_i} \cos(N_0 t - \chi_1^{D_i}) + \pi_2^{D_i} \cos(2N_0 t - \chi_2^{D_i}) + X^{D_i}(t) \right] \quad (4)$$

при $i = 1, 2$. Моменты M_1 и M_2 составим из компонент M_{10} и M_{20} , определяющих годовое колебание, переменных гармонических и случайных составляющих \tilde{M}_1 и \tilde{M}_2 , описываемых выражениями:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_i &= M_1^i \cos(N_0 t - \chi_1^{M_i}) + \\ &+ M_2^i \cos(2N_0 t - \chi_2^{M_i}) + X^{M_i}(t), \quad (5) \end{aligned}$$

а также малых возмущающих нелинейных моментов $\Delta M_i = \Delta M_i(p, q, t)$ ($i = 1, 2$).

В (3)–(5) приняты следующие обозначения: N — частота чандлеровских (собственных) колебаний; N_0 — близкая к N комбинационная частота, происходящая вследствие годичной и шестилетней составляющих; D — коэффициент регулярных моментов диссипативных сил; $\pi_1^{N_i, D_i}$, $\pi_2^{N_i, D_i}$ и $\chi_1^{N_i, D_i, M_i}$, $\chi_2^{N_i, D_i, M_i}$ ($i = 1, 2$) — амплитуды и начальные фазы гармонических аддитивных и параметрических возмущений на частотах N_0 , $2N_0$.

Будем сначала считать, что компоненты широкополосных возмущений $X^{N_1}(t) = X^{N_2}(t) = X_3(t)$, $X^{D_1}(t) = X^{D_2}(t) = X_4(t)$ ($i = 1, 2$) представляют собой нормальные действительные случайные процессы, удовлетворяющие уравнению формирующего фильтра первого порядка [23]:

$$\dot{X}_j = -\alpha_j X_j + \sigma_j \sqrt{2\alpha_j} V_j \quad (j = 3, 4), \quad (6)$$

где α_j , σ_j — параметры фильтра, V_j — нормальный белый шум единичной интенсивности. При $t \gg \alpha_j^{-1}$ дисперсии и ковариационные функции X_j определяются формулами [23]:

$$\begin{aligned} D_j^X &= \sigma_j^2, & K_{ij}^X &= \sigma_j^2 \rho_{ij}, \\ k_j^X(\tau) &= \sigma_j^2 e^{-\alpha_j |\tau|}, & k_{ij}^X &= \sigma_j^2 \rho_{ij} e^{-\alpha_j |\tau|}, \end{aligned}$$

где ρ_{ij} — коэффициенты взаимной корреляции ($i, j = 3, 4$). Что касается компонент $X^{M_i}(t)$, то примем их нормальными белыми шумами $[V_1 V_2]^T$, $V_1 = X^{M_1}(t)$, $V_2 = X^{M_2}(t)$ с интенсивностями ν_{ij} ($i, j = \overline{1, 2}$).

В результате уравнения (1) и (2) примут следующий вид

$$\begin{aligned} \dot{p} + N \left[1 + \pi_1^{N_1} \cos(N_0 t - \chi_1^{N_1}) + \right. \\ \left. + \pi_2^{N_1} \cos(2N_0 t - \chi_2^{N_1}) + X_3(t) \right] q + \\ + D \left[1 + \pi_1^{D_1} \cos(N_0 t - \chi_1^{D_1}) + \right. \\ \left. + \pi_2^{D_1} \cos(2N_0 t - \chi_2^{D_1}) + X_4(t) \right] p = \\ = M_{10} + M_1^1 \cos(N_0 t - \chi_1^{M_1}) + \\ + M_2^1 \cos(2N_0 t - \chi_2^{M_1}) + V_1(t) + \Delta M_1(p, q, t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{q} - N \left[1 + \pi_1^{N_2} \cos(N_0 t - \chi_1^{N_2}) + \right. \\ \left. + \pi_2^{N_2} \cos(2N_0 t - \chi_2^{N_2}) + X_3(t) \right] p + \\ + D \left[1 + \pi_1^{D_2} \cos(N_0 t - \chi_1^{D_2}) + \right. \\ \left. + \pi_2^{D_2} \cos(2N_0 t - \chi_2^{D_2}) + X_4(t) \right] q = \\ = M_{20} + M_1^2 \cos(N_0 t - \chi_1^{M_2}) + \\ + M_2^2 \cos(2N_0 t - \chi_2^{M_2}) + V_2(t) + \Delta M_2(p, q, t). \quad (7) \end{aligned}$$

Уравнения (7) будем понимать в смысле Стратоновича [23].

Случай, когда все компоненты $X_j = X_j(t)$ ($j = 1, 4$) являются нормальными (гауссовскими) белыми шумами, происходящими от одного гравитационно-приливного источника, т. е.

$$\begin{aligned} V_1 = \gamma_1 V, \quad V_2 = \gamma_2 V, \\ X_3 = \gamma_3 V, \quad X_4 = \gamma_4 V, \quad (8) \end{aligned}$$

(где γ_j — известные коэффициенты; V — скалярный нормальный белый шум интенсивности ν), описывается уравнениями (7).

Уравнения (7) при условии (8) будем понимать в смысле Ито [23]. Правила перехода от уравнений в смысле Стратоновича к уравнениям в смысле Ито даны в [8–11].

3 Квазилинейные корреляционные методы построения аналитических информационных моделей

Вследствие высокой добротности системы (7) и наличия быстрых по сравнению с периодом чандлеровских колебаний реализаций случайных широкополосных возмущений $V = [V_1 V_2 V_3 V_4]^T$ прямая компьютерная реализация модели (6), (7) по методу статистического моделирования [23] встречает серьезные вычислительные трудности.

Для получения приближенных дифференциальных уравнений корреляционной модели флуктуаций колебаний полюса Земли применим метод корреляционного аналитического моделирования, основанный на статистической линеаризации [23]. С этой целью перейдем к новым действительным переменным, положив

$$Y_1 = p, \quad Y_2 = q, \quad Y_3 = X_3, \quad Y_4 = X_4,$$

и проведем статистическую линеаризацию параметрических и нелинейных ΔM_i возмущений согласно [23]:

$$Y_i Y_j \approx m_i m_j + K_{ij} + m_j Y_i^0 + m_i Y_j^0 \quad (i, j = \overline{1, 4}), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_i = \Delta_0 M_i(m, K) + \Delta_{1i} M_i(m, K) Y_1^0 + \\ + \Delta_{2i} M_i(m, K) Y_2^0, \end{aligned}$$

где $m_i = M Y_i$ — математические ожидания; $Y_i^0 = Y_i - m_i$ — центрированные составляющие; $K_{ij} = M Y_i^0 Y_j^0$ — дисперсии и ковариации; $\Delta_0 M_i = M[\Delta M_i]$, $\Delta_{ji} M_i = \partial \Delta M_i / \partial m_j$ ($i, j = 1, 2$). Тогда (6), (7) при условии (9) будут статистически эквивалентны следующей взаимосвязанной детерминированной нелинейной системе для математических ожиданий m_i :

$$\begin{aligned} \dot{m} = F, \quad m = [m_1 m_2 m_3 m_4]^T, \quad F = [F_1 F_2 F_3 F_4]^T, \\ m_0 = m(t_0) = M [p(t_0) q(t_0)]^T \quad (10) \end{aligned}$$

и линейных стохастических уравнений для центрированных случайных составляющих Y_i^0 ($Y_i^0 = Y_i - m_i$):

$$\dot{Y}_1^0 = -N Y_2^0 + F_1^0 + V_1, \quad (11)$$

$$\dot{Y}_2^0 = +N Y_1^0 + F_2^0 + V_2,$$

$$\dot{Y}_j^0 = -\alpha Y_j^0 + \sigma_j \sqrt{2\alpha_i} V_j \quad (j = 3, 4). \quad (12)$$

В (10)–(12) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} F_1 = F_1(m, K, N_0 t, 2N_0 t) = M_{10} + \\ + M_{11} \cos(N_0 t - \chi_1^{M_1}) + M_{12} \cos(2N_0 t - \chi_2^{M_1}) - \\ - N \left\{ \left[\pi_1^{N_1} \cos(N_0 t - \chi_1^{N_1}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \pi_2^{N_1} \cos(2N_0 t - \chi_2^{N_1}) \right] m_2 + m_2 m_3 + k_{23} \right\} - \\ - D \left\{ \left[1 + \pi_1^{D_1} \cos(N_0 t - \chi_1^{D_1}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \pi_2^{D_1} \cos(2N_0 t - \chi_2^{D_1}) \right] m_1 + m_1 m_4 + k_{14} \right\} + \\ + \Delta_0 M_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2 = F_2(m, K, N_0 t, 2N_0 t) = M_{20} + \\ + M_{21} \cos(N_0 t - \chi_1^{M_2}) + M_{22} \cos(2N_0 t - \chi_2^{M_2}) + \\ + N \left\{ \left[\pi_1^{N_2} \cos(N_0 t - \chi_1^{N_2}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \pi_2^{N_2} \cos(2N_0 t - \chi_2^{N_2}) \right] m_1 + m_1 m_3 + k_{13} \right\} - \\ - D \left\{ \left[1 + \pi_1^{D_2} \cos(N_0 t - \chi_1^{D_2}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \pi_2^{D_2} \cos(2N_0 t - \chi_2^{D_2}) \right] k m_2 + m_2 m_4 + k_{24} \right\} + \\ + \Delta_0 M_2, \end{aligned}$$

$$F_3 = -\alpha_3 m_3, \quad F_4 = -\alpha_4 m_4; \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 F_1^0 &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial F_1}{\partial m_i} Y_i^0 = \\
 &= \left\{ -D \left[1 + \pi_1^{D_1} \cos \left(N_0 t - \chi_1^{D_1} \right) + \right. \right. \\
 &+ \left. \pi_2^{D_1} \cos \left(2N_0 t - \chi_2^{D_1} \right) + m_4 \right] + \Delta_1 M_1 \right\} Y_1^0 + \\
 &+ \left\{ -N \left[\pi_1^{N_1} \cos \left(N_0 t - \chi_1^{N_1} \right) + \right. \right. \\
 &+ \left. \pi_2^{N_1} \cos \left(2N_0 t - \chi_2^{N_1} \right) + m_3 \right] + \Delta_{12} M_1 \right\} Y_2^0 - \\
 &\quad - N m_2 Y_3^0 - D m_1 Y_4^0, \\
 F_2^0 &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial F_2}{\partial m_i} Y_i^0 = \left\{ N \left[\pi_1^{N_2} \cos \left(N_0 t - \chi_1^{N_2} \right) + \right. \right. \\
 &+ \left. \pi_2^{N_2} \cos \left(2N_0 t - \chi_2^{N_2} \right) + m_3 \right] + \Delta_{21} M_2 \right\} Y_1^0 + \\
 &+ \left\{ -D \left[1 + \pi_1^{D_2} \cos \left(N_0 t - \chi_1^{D_2} \right) + \right. \right. \\
 &+ \left. \pi_2^{D_2} \cos \left(2N_0 t - \chi_2^{D_2} \right) + m_4 \right] + \Delta_{22} M_1 \right\} Y_2^0 + \\
 &\quad + N m_1 Y_3^0 - D m_2 Y_4^0, \quad (14)
 \end{aligned}$$

где $K = [k_{ij}]$ ($i, j = \overline{1, 4}$) — ковариационная матрица Y_i^0 .

В силу линейности уравнения (11) и (12) при условиях (13) и (14) допускают следующую матричную запись:

$$\dot{Y}^0 = \alpha(t, m, K) Y^0 + \beta V. \quad (15)$$

Здесь введены обозначения

$$\begin{aligned}
 Y^0 &= [Y_1^0 Y_2^0 Y_3^0 Y_4^0]^T, \\
 V &= [V_1 V_2 V_3 V_4]^T, \\
 \beta &= \text{diag} (1, 1, \sigma_3 \sqrt{2\alpha_3}, \sigma_4 \sqrt{2\alpha_4}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \alpha(t, m, K, N_0 t, 2N_0 t) = \\
 &= [\alpha_{ij}(t, m, K)] \quad (i, j = \overline{1, 4}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{11} &= \alpha_{11}(t, m, N_0 t, 2N_0 t) = \\
 &= -D \left[1 + \pi_1^{D_1} \cos \left(N_0 t - \chi_1^{D_1} \right) + \right. \\
 &+ \left. \pi_2^{D_1} \cos \left(2N_0 t - \chi_2^{D_1} \right) + m_4 \right] + \Delta_{11} M_1, \\
 \langle \alpha_{11} \rangle &= -D + \langle \Delta_{11} M_1 \rangle,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{12} &= \alpha_{12}(t, m, N_0 t, 2N_0 t) = \\
 &= -N \left[1 + \pi_1^{N_1} \cos \left(N_0 t - \chi_1^{N_1} \right) + \right. \\
 &+ \left. \pi_2^{N_1} \cos \left(2N_0 t - \chi_2^{N_1} \right) + m_3 \right] + \Delta_{12} M_1,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \langle \alpha_{12} \rangle &= -N + \langle \Delta_{12} M_1 \rangle, \\
 \alpha_{13} &= \alpha_{13}(t, m, N_0 t, 2N_0 t) = -N m_2, \\
 a_{14}(t, m) &= -D m_1, \\
 \alpha_{21} &= \alpha_{21}(t, m, N_0 t, 2N_0 t) = \\
 &= N \left[1 + \pi_1^{N_2} \cos \left(N_0 t - \chi_1^{N_2} \right) + \right. \\
 &+ \left. \pi_2^{N_2} \cos \left(2N_0 t - \chi_2^{N_2} \right) + m_3 \right] + \Delta_{21} M_2, \\
 \langle \alpha_{21} \rangle &= N + \langle \Delta_{21} M_2 \rangle,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{22} &= \alpha_{22}(t, m, N_0 t, 2N_0 t) = \\
 &= -D \left[1 + \pi_1^{D_2} \cos \left(N_0 t - \chi_1^{D_2} \right) + \right. \\
 &+ \left. \pi_2^{D_2} \cos \left(2N_0 t - \chi_2^{D_2} \right) + m_4 \right] + \Delta_{22} M_2, \\
 \langle \alpha_{22} \rangle &= -D + \langle \Delta_{22} M_2 \rangle,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{23} &= \alpha_{23}(t, m, N_0 t, 2N_0 t) = N m_1, \\
 \alpha_{24} &= \alpha_{24}(t, m, N_0 t, 2N_0 t) = -D m_2, \\
 \alpha_{31} &= \alpha_{32} = \alpha_{33} = 0, \\
 \alpha_{33} &= -\alpha_3, \\
 \alpha_{41} &= \alpha_{42} = \alpha_{43} = 0, \\
 \alpha_{44} &= -\alpha_4, \\
 \alpha_{25} &= \alpha_{31}(t, m, N_0 t, 2N_0 t) = \alpha_{32}(t, m) = \\
 &= \alpha_{34}(t, m) = 0, \\
 \alpha_{20} &= \alpha_{41}(t, m, N_0 t, 2N_0 t) = \alpha_{42}(t, m) = \\
 &= \alpha_{43}(t, m) = 0, \quad (16)
 \end{aligned}$$

где $\langle \dots \rangle$ — символ усреднения по времени $2\pi/N_0$.

Обозначим через $\langle \Phi(s, m) \rangle$ эквивалентную передаточную функцию, в силу (15) связывающую Y^0 и V при усредненных на $2\pi/N_0$ коэффициентах $\langle \alpha(t, m, N_0 t, 2N_0 t) \rangle$:

$$Y^0 = \langle \Phi(s, m, N_0 t, 2N_0 t) \rangle V, \quad (17)$$

где $\Phi(s, m) = \beta [\langle \alpha(t, m, N_0 t, 2N_0 t) \rangle - s I_4]^{-1}$, I_4 — единичная (4×4) -матрица.

В соответствии с формулами теории линейных стохастических систем [23] уравнениям (15) отвечают следующие детерминированные уравнения для дисперсий и ковариаций $K(t) = [K_{ij}]$ ($i, j = \overline{1, 4}$), ковариационных и взаимных ковариационных функций $K(t_1, t_2) = [K_{ij}(t_1, t_2)]$ ($i, j = \overline{1, 4}$):

$$\begin{aligned}
 \dot{K}(t) &= \alpha(t, m, N_0 t, 2N_0 t) K(t) + \\
 &+ K(t) \alpha(t, m, N_0 t, 2N_0 t)^T + \beta \nu \beta^T, \\
 K(t_0) &= K_0, \quad (18)
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} = K(t_1, t_2) \alpha(t_2, m_2, N_0 t_2, 2N_0 t_2)^T \quad (t_1 < t_2) \quad (19)$$

(при $t_1 > t_2$ $K(t_1, t_2) = K(t_2, t_1)^T$). Здесь $\nu = [\nu_{ij}]$ ($i, j = \overline{1, 4}$) – постоянная матрица интенсивности векторного белого шума $V = [V_1 V_2 V_3 V_4]^T$.

Вследствие зависимости $F = F(m, K, N_0 t, 2N_0 t)$ и $\alpha = \alpha(m, K, N_0 t, 2N_0 t)$ от m и K система детерминированных уравнений (10), (18) и (19) для математических ожиданий, дисперсий и ковариаций представляет собой взаимосвязанную замкнутую систему, определяющую корреляционную дифференциальную модель колебаний полюса Земли с параметрическими возмущениями.

Таким образом, в основе базового квазилинейного корреляционного метода построения аналитических информационных стохастических моделей лежат уравнения (10), (18) и (19). Суждение об устойчивости метода можно сделать на основе анализа устойчивости матрицы α , определяемой (16).

В силу высокой добротности системы (7) базовые моментные уравнения (10), (18) и (19) могут быть заменены укороченными первого порядка для медленно меняющихся переменных, описывающих колебания полюса Земли на частоте N .

Из базовых моментных уравнений с учетом (17) вытекают спектрально-корреляционные версии квазилинейного метода, обобщающие [12, 19]. Наконец, если стохастические возмущения в исходных уравнениях заданы стохастическими каноническими представлениями (каноническими разложениями и интегральными каноническими представлениями [23]), то (10) сохраняются, а (15) позволяют получить детерминированные уравнения для координатных функций представлений. Тогда вместо (18) и (19) будут использоваться известные конечные соотношения для $K(t)$ и $K(t_1, t_2)$ [23].

В качестве иллюстрации рассмотрим три тестовых примера практического применения квазилинейного метода из состава информационных ресурсов по проблеме «Статистическая динамика вращения Земли».

4 Пример 1. Регулярные колебания полюса Земли

Для изучения регулярных колебаний полюса Земли при $\Delta M_i = 0$ на основе уравнений для математических ожиданий (10) введем нормальные координаты a и $\Delta\psi$, имеющие смысл амплитуды и поправки к частоте, положив:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_{10} + a \cos \psi, & m_2 &= m_{20} + a \sin \psi, \\ \psi &= Nt + \Delta\psi, \\ m_{10} &= A_{10} = A_{10}(a, \Delta\psi, Y_3, Y_4, N_0 t, 2N_0 t) = \\ &= -N^{-1} \langle F_2 \rangle, \\ m_{20} &= A_{20} = A_{20}(a, \Delta\psi, Y_3, Y_4, N_0 t, 2N_0 t) = \\ &= N^{-1} \langle F_1 \rangle, \end{aligned} \quad (20)$$

где $\langle \dots \rangle$ – символ усреднения по периоду чандлеровских колебаний $T = 2\pi N^{-1}$. Тогда в силу (10) придем к следующим моментным уравнениям первого порядка для амплитудно-частотных характеристик:

$$\begin{aligned} \langle \dot{a} \rangle &= A = A(a, \Delta\psi, Y_3, Y_4, N_0 t, 2N_0 t) = \\ &= \langle F_1 \cos \psi \rangle + \langle F_2 \sin \psi \rangle, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \langle \Delta\dot{\psi} \rangle &= B = B(a, \Delta\psi, Y_3, Y_4, N_0 t, 2N_0 t) = \\ &= -a^{-1} \langle F_1 \sin \psi \rangle + a^{-1} \langle F_2 \cos \psi \rangle. \end{aligned} \quad (22)$$

Функции A_{10} , A_{20} , A и B в развернутой записи имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} A_{10} &= -\frac{1}{N} \{ M_{20} + N [\langle m_1 m_3 \rangle + \langle k_{13} \rangle + \\ &+ \frac{1}{2} \pi_1^{N_2} a \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{N_2})] - D [\langle m_2 m_4 \rangle + \langle k_{24} \rangle - \\ &- m_{20} + \frac{1}{2} \pi_1^{D_2} a \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{D_2})] \}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} A_{20} &= \frac{1}{N} \{ M_{10} - N [\langle m_2 m_3 \rangle + \langle k_{23} \rangle - \\ &- \frac{1}{2} \pi_1^{N_1} a \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{N_1})] - \\ &- D [\langle m_1 m_4 \rangle + \langle k_{14} \rangle + \\ &+ m_{10} + \frac{1}{2} \pi_1^{D_1} a \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{D_1})] \}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{M_{11}}{2} \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{M_1}) + \frac{M_{21}}{2} \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{M_2}) + \\ &+ \frac{N}{2} \left[-\pi_1^{N_1} m_{20} \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{N_1}) + \right. \\ &+ \pi_1^{N_2} m_{10} \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{N_2}) - \\ &- \frac{\pi_2^{N_1} a}{2} \sin(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_1}) + \frac{\pi_2^{N_2} a}{2} \sin(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_2}) - \\ &\left. - 2\langle k_{23} \cos \psi \rangle + 2\langle k_{13} \sin \psi \rangle \right] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{D}{2} \left[2a + \pi_1^{D_1} m_{10} \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{D_1}) - \right. \\
 & \quad \left. - \pi_1^{D_2} m_{20} \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{D_2}) + \right. \\
 & \left. + \frac{\pi_2^{D_1} a}{2} \cos(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_1}) - \frac{\pi_2^{D_2} a}{2} \cos(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_2}) - \right. \\
 & \quad \left. - 2\langle k_{14} \cos \psi \rangle - 2\langle k_{24} \sin \psi \rangle \right], \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B = & -\frac{M_{11}}{2a} \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{M_1}) + \frac{M_{21}}{2a} \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{M_2}) + \\
 & + \frac{N}{2a} \left[\pi_1^{N_1} m_{20} \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{N_1}) + \right. \\
 & \quad \left. + \pi_1^{N_2} m_{10} \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{N_2}) - \right. \\
 & \left. - \frac{\pi_2^{N_1} a}{2} \cos(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_1}) + \frac{\pi_2^{N_2} a}{2} \cos(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_2}) + \right. \\
 & \quad \left. + 2\langle k_{13} \cos \psi \rangle + 2\langle k_{23} \sin \psi \rangle \right] - \\
 & - \frac{D}{2a} \left[-\pi_1^{D_1} m_{10} \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{D_1}) + \right. \\
 & \quad \left. + \pi_1^{D_2} m_{20} \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{D_2}) - \right. \\
 & \left. - \frac{\pi_2^{D_1} a}{2} \sin(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_1}) + \frac{\pi_2^{D_2} a}{2} \sin(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_2}) - \right. \\
 & \quad \left. - 2\langle k_{14} \sin \psi \rangle + 2\langle k_{24} \cos \psi \rangle \right], \quad (26)
 \end{aligned}$$

где волной сверху отмечены фазовые соотношения

$$\begin{aligned}
 \tilde{\chi}_{1,2}^{D_i, N_i, M_i} &= \chi_{1,2}^{D_i, N_i, M_i} - \delta_N t, \delta_N = \\
 &= N - N_0 > 0, \quad i = \overline{1, 4}. \quad (27)
 \end{aligned}$$

При известных ковариационных характеристиках k_{ij} ($i, j = \overline{1, 4}$) уравнения (21) и (22) в совокупности с третьим и четвертым уравнением (10) представляют собой удобную для аналитического моделирования детерминированную систему для изучения медленно меняющихся параметров трендов m_{10}, m_{20} , амплитуды a и поправки к частоте $\Delta\psi$ регулярных колебаний на частоте, близкой к N_0 .

Рассмотрим некоторые важные свойства этой модели. Полагая в (23)–(26):

$$\begin{aligned}
 D \ll N, \quad M_{10} \gg Dm_{10}, \quad M_{20} \gg Dm_{20}, \\
 m_{3,4} = 0, \quad k_{13} = k_{23} = k_{14} = k_{24} = 0, \quad (28)
 \end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned}
 A_{10} \approx & -\frac{1}{N} \left[M_{20} + \frac{N}{2} \pi_1^{N_2} a \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{N_2}) - \right. \\
 & \left. - \frac{D\pi_1^{D_2}}{2} a \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{D_2}) \right],
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{20} \approx & \frac{1}{N} \left[M_{10} + \frac{N\pi_1^{N_1}}{2} a \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{N_1}) - \right. \\
 & \left. - \frac{D\pi_1^{D_1}}{2} a \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{D_1}) \right],
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A \approx & \frac{M_{11}}{2} \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{M_1}) + \frac{M_{21}}{2} \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{M_2}) + \\
 & + \frac{N}{2} a \left[-\pi_2^{N_1} \sin(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_1}) + \right. \\
 & \quad \left. + \pi_2^{N_2} \sin(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_2}) \right] - \\
 & - Da \left[1 + \frac{\pi_2^{D_1}}{4} \cos(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_1}) - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\pi_2^{D_2}}{4} \cos(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_2}) \right], \quad (29)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B \approx & -\frac{M_{11}}{2a} \sin(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{M_1}) + \frac{M_{21}}{2a} \cos(\Delta\psi + \tilde{\chi}_1^{M_2}) + \\
 & + \frac{N}{4} \left[-\pi_2^{N_1} \cos(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_1}) + \right. \\
 & \quad \left. + \pi_2^{N_2} \cos(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_2}) \right] - \\
 & - \frac{D}{4} \left[-\pi_2^{D_1} \sin(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_1}) + \right. \\
 & \quad \left. + \pi_2^{D_2} \sin(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_2}) \right]. \quad (30)
 \end{aligned}$$

При $N = N_0$, полагая в (21) и (22) $\dot{a} = 0$, $\Delta\dot{\psi} = 0$, получим уравнения для определения стационарных значений a_* и $\Delta\psi_*$:

$$\begin{aligned}
 & M_{11} \cos(\Delta\psi_* + \chi_1^{M_1}) + M_{21} \sin(\Delta\psi_* + \chi_1^{M_2}) + \\
 & + a_* \left\{ N \left[-\pi_2^{N_1} \sin(2\Delta\psi_* + \chi_2^{N_1}) + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \pi_2^{N_2} \sin(2\Delta\psi_* + \chi_2^{N_2}) \right] - \right. \\
 & - D \left[1 + \frac{\pi_2^{D_1}}{4} \cos(2\Delta\psi_* + \chi_2^{D_1}) - \right. \\
 & \quad \left. \left. - \frac{\pi_2^{D_2}}{4} \cos(2\Delta\psi_* + \chi_2^{D_2}) \right] \right\} = 0,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -M_{11} \sin(\Delta\psi_* + \chi_1^{M_1}) + M_{21} \cos(\Delta\psi_* + \chi_1^{M_2}) + \\
 & + \frac{a_*}{2} \left\{ N \left[-\pi_2^{N_1} \cos(2\Delta\psi_* + \chi_2^{N_1}) + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \pi_2^{N_2} \cos(2\Delta\psi_* + \chi_2^{N_2}) \right] - \right.
 \end{aligned}$$

$$- D \left[-\pi_2^{D_1} \sin \left(2\Delta\psi_* + \chi_2^{D_1} \right) + \pi_2^{D_2} \sin \left(2\Delta\psi_* + \chi_2^{D_2} \right) \right] \Big\} = 0.$$

При этом в силу (20) тренды будут определяться уравнениями

$$m_{10} = -\frac{M_{20}}{N} - \frac{\pi_1^{N_2}}{2} a \cos \left(\Delta\psi + \chi_1^{N_2} \right) - \frac{D}{2N} \pi_1^{D_2} a \sin \left(\Delta\psi + \chi_1^{D_2} \right),$$

$$m_{20} = \frac{M_{10}}{N} + \frac{\pi_1^{N_1}}{2} a \sin \left(\Delta\psi + \chi_1^{N_1} \right) - \frac{D}{2N} \pi_1^{D_1} a \cos \left(\Delta\psi + \chi_1^{D_1} \right).$$

Отсюда можно сделать следующие выводы.

Во-первых, имеют место тренды m_{10} и m_{20} , вызываемые моментами M_{10} и M_{20} , а также гармоническими параметрическими гироскопическими и диссипативными моментами на частоте N_0 . При $N \neq N_0$ тренды наряду с медленно меняющимися составляющими содержат биения на частоте $\delta_N = N - N_0$.

Во-вторых, амплитудно-частотные характеристики на частоте N_0 , определяемые (21), (22), (29) и (30), наряду с членами, пропорциональными аддитивным моментам M_{11} , M_{21} , содержат компоненты, происходящие от параметрических гармонических гироскопических и диссипативных моментов на удвоенной частоте $2N_0$. При $N \neq N_0$ амплитудно-частотные характеристики, кроме медленно меняющихся составляющих, содержат биения на частоте δ_N . Так как $N \gg D$, то гармонические гироскопические параметрические возмущения оказывают более сильное влияние, чем соответствующие диссипативные. В силу (25) эффективный динамический коэффициент диссипации определяется из соотношения:

$$D^\ominus = -\frac{\partial A}{\partial a} = D \left[1 + \frac{1}{4} \pi_2^{D_1} \cos \left(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_1} \right) - \frac{1}{4} \pi_2^{D_2} \cos \left(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{D_2} \right) \right] + \frac{N}{4} \left[\pi_2^{N_1} \sin \left(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_1} \right) - \pi_2^{N_2} \sin \left(2\Delta\psi + \tilde{\chi}_2^{N_2} \right) \right]. \quad (31)$$

При этом $\Delta\psi$ находится интегрированием из (21), (22) с учетом (25)–(27). При $N = N_0$ эффективный коэффициент диссипации D^\ominus не содержит биений

на частоте δ_N . Для $\pi_2^{N_1} = \pi_2^{N_2} = 0$ из (28) приходим к результату [19], объясняющему эффект динамической стабилизации чандлеровских колебаний вследствие диссипативных возмущений на частоте $2N_0$. Для $\pi_2^{N_1}, \pi_2^{N_2} \neq 0$ соответствующий эффект обнаружен в [9]. При $N = N_0$, $\chi_2^{D_1} = \chi_2^{D_2} = \chi_2^D$ и $\chi_2^{N_1} = \chi_2^{N_2} = \chi_2^N$ из (31) имеем следующее выражение для D^\ominus :

$$D^\ominus = D \left[1 + \frac{1}{4} \left(\pi_2^{D_1} - \pi_2^{D_2} \right) \cos 2\Delta\psi_* \right] + \frac{N}{4} \left(\pi_2^{N_1} - \pi_2^{N_2} \right) \sin 2\Delta\psi_*.$$

Отсюда следует, что при одинаковых $\pi_2^{D_i N_i}$ динамический коэффициент диссипации равен статистическому значению $D^\ominus = D$. При разных $\pi_2^{N_i}$ принципиально возможен эффект увеличения диссипации.

5 Пример 2. Стохастические колебания полюса Земли при независимых аддитивных случайных возмущениях

Уравнения (18) при отсутствии случайных параметрических возмущений ($Y_3, Y_4 = 0$) и $\Delta M_i = 0$ принимают вид следующей линейной детерминированной системы уравнений с периодическими коэффициентами α_{ij} ($i, j = 1, 2$):

$$\begin{aligned} \dot{k}_{11} &= \nu_1 + 2(\alpha_{11}k_{11} + \alpha_{12}k_{12}), \\ \dot{k}_{22} &= \nu_2 + 2(\alpha_{21}k_{12} + \alpha_{22}k_{22}), \\ \dot{k}_{12} &= \alpha_{21}k_{11} + (\alpha_{11} + \alpha_{22})k_{12} + \alpha_{12}k_{22}, \end{aligned} \quad (32)$$

где α_{ij} ($i, j = 1, 2$) определены (16) при $m_3 = m_4 = 0$. Отсюда видно, что решение уравнений (32) приводит к выражениям вида

$$k_{ij} = k_{ij}^0 + k'_{1,ij} \cos N_0 t + k''_{1,ij} \sin N_0 t + k'_{2,ij} \cos 2N_0 t + k''_{2,ij} \sin 2N_0 t + \text{высшие гармоники}. \quad (33)$$

Здесь $k_{0,ij}$ — определяют усредненные на интервале времени $2\pi/N_0$ постоянные значения дисперсий $k_{11} = D_p$, $k_{22} = D_q$ и ковариации $k_{12} = k_{pq}$; $k'_{h,ij}$ и $k''_{h,ij}$ ($h = 1, 2, \dots, i, j = 1, 2$) — гармоники k_{ij} на частотах $N_0, 2N_0, \dots, hN_0$.

В этом случае уравнения (19) для ковариационных функций имеют вид при $t_1 < t_2$:

$$\begin{aligned}\frac{\partial K_{11}(t, t_2)}{\partial t_2} &= \alpha_{11, t_2} K_{11}(t_1, t_2) + \alpha_{12, t_2} K_{12}(t_1, t_2), \\ \frac{\partial K_{12}(t, t_2)}{\partial t_2} &= \alpha_{21, t_2} K_{11}(t_1, t_2) + \alpha_{22, t_2} K_{12}(t_1, t_2), \\ \frac{\partial K_{21}(t, t_2)}{\partial t_2} &= \alpha_{11, t_2} K_{21}(t_1, t_2) + \alpha_{12, t_2} K_{22}(t_1, t_2), \\ \frac{\partial K_{22}(t, t_2)}{\partial t_2} &= \alpha_{21, t_2} K_{21}(t_1, t_2) + \alpha_{22, t_2} K_{22}(t_1, t_2),\end{aligned}$$

а при $t > t_2$ $K(t_1, t_2) = K(t_2, t_1)^T$. Здесь введено обозначение $\alpha_{ij, t_2} = \alpha_{ij}(t_2, m_2, N_0 t_2, 2N_0 t_2)$.

Таким образом, аддитивные случайные возмущения приводят к стохастическим колебаниям, ковариационные характеристики которых описываются уравнениями (32), а регулярные компоненты — уравнениями для математических ожиданий (10) при $m_3 = m_4 = 0$, $k_{13} = k_{23} = k_{14} = k_{24} = 0$ в формулах (23)–(26). Из этих формул следует, что аддитивные случайные возмущения не влияют на регулярные амплитудно-частотные характеристики и тренды.

В установившемся режиме в силу (17) спектральная плотность $s_y(\omega)$ и ковариационная матрица $K = [k_{ij}]$ ($i, j = 1, 2$) определяются формулами спектрально-корреляционной теории стохастических систем [23]:

$$\begin{aligned}s_y(\omega) &= \langle \Phi(s, m, N_0 t, 2N_0 t) \rangle s_v \langle \Phi(s, m, N_0 t, 2N_0 t) \rangle^*, \\ K_y &= \int_{-\infty}^{\infty} s_y(\omega) d\omega,\end{aligned}$$

где * — символ сопряжения; $s_v = \nu(2\pi)^{-1}$ и $\nu = [\nu_{ij}]$ ($i, j = 1, 2$) — спектральная плотность и интенсивность векторного белого шума $V = [V_1 V_2]^T$ соответственно.

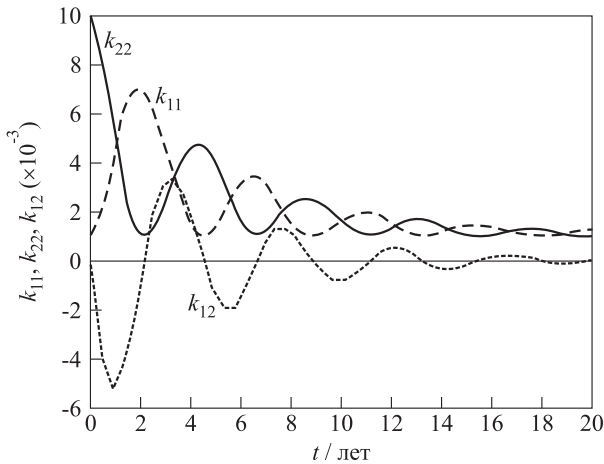


Рис. 1 Зависимости дисперсий k_{11} , k_{22} и ковариации k_{12} от времени для усредненных значений параметров

На рис. 1 показаны результаты моделирования зависимости дисперсий k_{11} , k_{22} и ковариации k_{12} в зависимости от безразмерного времени $\bar{t} = Nt$, выполненные на основе уравнений (32) при усредненных значениях $\langle \alpha_{ij} \rangle$ в (16): $\langle \alpha_{11} \rangle = \langle \alpha_{22} \rangle = -D$, $\langle \alpha_{21} \rangle = -\langle \alpha_{12} \rangle = N$, начальных условиях: $k_{11}(0) = k_{22}(0) = ((10^{-2})'')^2$, $k_{12}(0) = 0$, $\nu_1 = \nu_2 = \nu = 2 \cdot 10^{-5}$ (''/год)² и $D^{-1} = 10$ лет. Дисперсии k_{11} , k_{22} и ковариации k_{12} колеблются с частотой N_0 и для $t \gg 10$ лет асимптотически стремятся к следующим стационарным значениям: $k_{11}^* = k_{22}^* = \nu/2D$, $k_{12}^* = 0$. Время установления колебаний имеет порядок $D^{-1} = 10$ лет.

6 Пример 3. Стохастические колебания полюса при независимых случайных аддитивных и параметрических возмущениях

При $\Delta M_i = 0$ и $D/N \ll 1$ и независимых возмущениях V_j для переменных Y_i ($i = \overline{1, 4}$) имеем следующие представления:

$$\begin{aligned}Y_1 &= m_{10} + a \cos \psi + Y_1^0, \\ Y_2 &= m_{20} + a \sin \psi + Y_2^0, \\ Y_3 &= m_3 + Y_3^0, \\ Y_4 &= m_4 + Y_4^0, \\ \psi &= Nt + \Delta\psi.\end{aligned}\quad (34)$$

Здесь тренды m_{10} , m_{20} определяются из (20) при условиях (23) и (24), амплитудно-частотные характеристики a , $\Delta\psi$ — из (21) и (22) при условиях (25)–(27), а ковариационные характеристики k_{ij} ($i, j = \overline{1, 4}$) — из (18) и (19). Уравнения (18) для дисперсий и ковариаций принимают вид:

$$\begin{aligned}\dot{k}_{11} &= \nu_1 + 2(\alpha_{11}k_{11} + \alpha_{12}k_{12} + \alpha_{13}k_{13}), \\ \dot{k}_{12} &= \alpha_{21}k_{11} + (\alpha_{11} + \alpha_{22})k_{12} + \alpha_{12}k_{22} + \\ &\quad + \alpha_{23}k_{13} + \alpha_{13}k_{23}, \\ \dot{k}_{22} &= \nu_2 + 2(\alpha_{21}k_{12} + \alpha_{22}k_{22} + \alpha_{23}k_{23}), \\ \dot{k}_{33} &= 2\alpha_3(\sigma_3^2 - k_{33}), \\ \dot{k}_{44} &= 2\alpha_4(\sigma_4^2 - k_{44}), \\ \dot{k}_{34} &= -(\alpha_3 + \alpha_4)k_{34}, \\ \dot{k}_{13} &= (\alpha_{11} - \alpha_3)k_{13} + \alpha_{12}k_{23} + \alpha_{13}k_{33}, \\ \dot{k}_{14} &= (\alpha_{11} - \alpha_4)k_{14} + \alpha_{12}k_{24} + \alpha_{13}k_{34}, \\ \dot{k}_{23} &= \alpha_{21}k_{13} + (\alpha_{22} - \alpha_3)k_{23} + \alpha_{23}k_{33}, \\ \dot{k}_{24} &= \alpha_{21}k_{14} + (\alpha_{22} - \alpha_4)k_{24} + \alpha_{23}k_{34}\end{aligned}\quad (35)$$

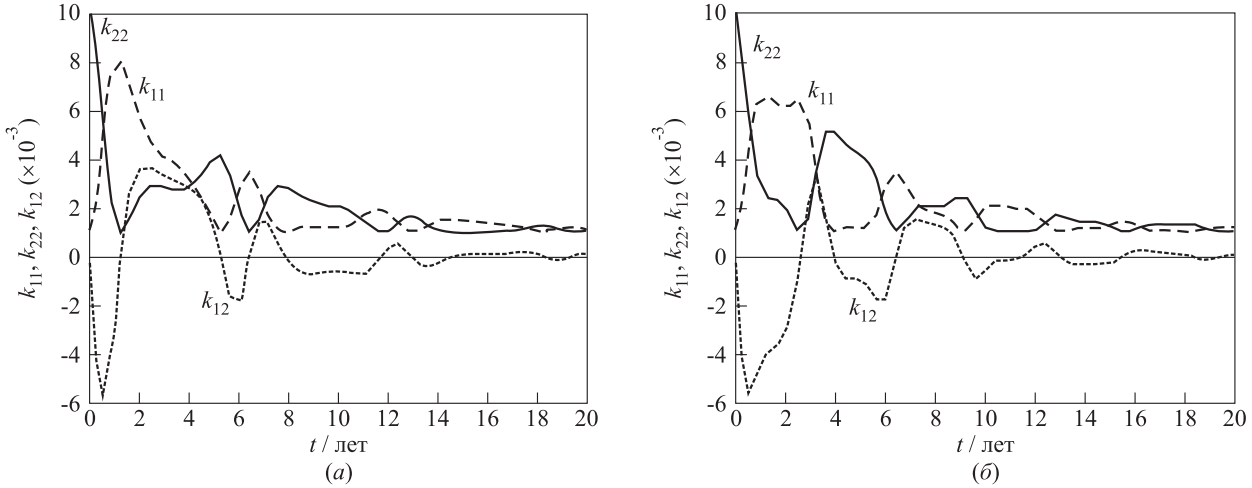


Рис. 2 Зависимости дисперсий k_{11}, k_{22} и ковариации k_{12} от времени для гироскопических гармонических возмущений на (а) чандлеровской частоте ($\pi_1^N = 1, \pi_2^N = 0$) и (б) удвоенной чандлеровской частоте ($\pi_1^N = 0, \pi_2^N = 1$)

при начальных условиях $k_{ij,0}$ ($i, j = \overline{1,4}$). Входящие в (35) коэффициенты $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(t, m, N_0t, 2N_0t)$ определяются (16). Решение уравнений (35) имеет вид (33). Таким образом, моментные уравнения первого порядка для стохастических колебаний полюса Земли при независимых случайных аддитивных и параметрических возмущениях для переменных $m_{10}, m_{20}, a, \Delta\psi, K = [k_{ij}]$ ($i, j = \overline{1,4}$) в (34) имеют вид (20)–(22) и (35).

Из этих уравнений следует ряд важных выводов. Во-первых, имеют место тренды m_{10} и m_{20} , вызываемые моментами M_{10} и M_{20} , а также параметрическими гармоническими и случайными гироскопическими и диссипативными моментами. Особенностью влияния случайных параметрических возмущений является появление следующих дополнительных статических составляющих:

$$m_{10} = -\langle k_{13} \rangle + \frac{D}{N} \langle k_{24} \rangle,$$

$$m_{20} = -\langle k_{23} \rangle - \frac{D}{N} \langle k_{14} \rangle.$$

Во-вторых, вследствие появления в (25) и (26) дополнительных составляющих на частоте $N = N_0$ случайные параметрические возмущения влияют на амплитудно-частотные характеристики, так что:

$$\Delta A = -\langle k_{23} \cos \psi \rangle + \langle k_{13} \sin \psi \rangle + \frac{D}{Na} (\langle k_{24} \sin \psi \rangle + \langle k_{14} \cos \psi \rangle),$$

$$\Delta B = \frac{N}{a} (-\langle k_{13} \cos \psi \rangle + \langle k_{23} \sin \psi \rangle) - \frac{D}{a} (-\langle k_{14} \sin \psi \rangle + \langle k_{24} \cos \psi \rangle),$$

поскольку выражения $\langle k_{ij} \cos \psi \rangle, \langle k_{ij} \sin \psi \rangle$ ($i = 1, 2, j = 3, 4$) в силу (35) отличны от нуля.

Наконец, приведем уравнения (19) при $D/N \ll 1$ для ковариационных функций в развернутом виде:

$$\frac{\partial K_{11}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = \alpha_{11,t_2} K_{11}(t_1, t_2) + \alpha_{12,t_2} K_{12}(t_1, t_2) + \alpha_{13,t_2} K_{13}(t_1, t_2),$$

$$\frac{\partial K_{12}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = \alpha_{21,t_2} K_{11}(t_1, t_2) + \alpha_{22,t_2} K_{12}(t_1, t_2) + \alpha_{23,t_2} K_{13}(t_1, t_2),$$

$$\frac{\partial K_{22}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = \alpha_{21,t_2} K_{21}(t_1, t_2) + \alpha_{22,t_2} K_{22}(t_1, t_2) + \alpha_{23,t_2} K_{23}(t_1, t_2),$$

$$\frac{\partial K_{21}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = \alpha_{11,t_2} K_{21}(t_1, t_2) + \alpha_{12,t_2} K_{22}(t_1, t_2) + \alpha_{13,t_2} K_{23}(t_1, t_2),$$

$$\frac{\partial K_{13}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = -\alpha_3 K_{13}(t_1, t_2),$$

$$\frac{\partial K_{14}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = -\alpha_4 K_{14}(t_1, t_2),$$

$$\frac{\partial K_{23}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = -\alpha_3 K_{23}(t_1, t_2),$$

$$\frac{\partial K_{24}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = -\alpha_4 K_{24}(t_1, t_2),$$

$$\frac{\partial K_{33}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = -\alpha_3 K_{33}(t_1, t_2),$$

$$\frac{\partial K_{34}(t_1, t_2)}{\partial t_2} = -\alpha_{43} K_{34}(t_1, t_2),$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial K_{43}(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= -\alpha_3 K_{43}(t_1, t_2), \\ \frac{\partial K_{44}(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= -\alpha_4 K_{44}(t_1, t_2), \\ \frac{\partial K_{31}(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= \alpha_{11, t_2} K_{31}(t_1, t_2) + \\ &+ \alpha_{12, t_2} K_{32}(t_1, t_2) + \alpha_{13, t_2} K_{33}(t_1, t_2), \\ \frac{\partial K_{41}(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= \alpha_{11, t_2} K_{41}(t_1, t_2) + \\ &+ \alpha_{12, t_2} K_{42}(t_1, t_2) + \alpha_{13, t_2} K_{43}(t_1, t_2), \\ \frac{\partial K_{32}(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= \alpha_{21, t_2} K_{31}(t_1, t_2) + \\ &+ \alpha_{22, t_2} K_{32}(t_1, t_2) + \alpha_{23, t_2} K_{33}(t_1, t_2), \\ \frac{\partial K_{42}(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= \alpha_{21, t_2} K_{41}(t_1, t_2) + \\ &+ \alpha_{22, t_2} K_{42}(t_1, t_2) + \alpha_{23, t_2} K_{43}(t_1, t_2).\end{aligned}$$

На рис. 2 показаны зависимости дисперсий и ковариации, полученные моделированием уравнений (32) при больших синфазных гироскопических гармонических возмущениях на частотах N_0 и $2N_0$. Отметим искажение формы колебаний k_{11} , k_{12} , k_{22} . Влияние гироскопических случайных и гармонических синфазных возмущений на частотах N_0 и $2N_0$ проявляется как в искажении формы колебаний k_{11} , k_{12} , k_{22} , так и в появлении малых дополнительных трендов $\sim 10^{-4}$ "/год.

7 Методы параметрического корреляционного построения аналитических информационных моделей

Уравнения (7) (понимаемые в смысле Ито) при условиях (8) и $\Delta M_i = 0$ ($i = 1, 2$) для переменных $Y = [Y_1 Y_2]^T$, $Y_1 = p$, $Y_2 = q$ допускают следующую векторную запись:

$$\dot{Y} = a_0 + aY + (b_0 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2)V,$$

где

$$a_0 = \begin{pmatrix} a_{01} \\ a_{02} \end{pmatrix}, \quad \langle a_0 \rangle = \begin{pmatrix} M_{10} \\ M_{20} \end{pmatrix}, \quad (36)$$

$$\begin{aligned}a_{0i} &= M_{i0} + M_1^i \cos(N_0 t - \chi_1^{M_1}) + \\ &+ M_2^i \cos(N_0 t - \chi_2^{M_2}) \quad (i = 1, 2), \\ a &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad \langle a \rangle = \begin{pmatrix} -D & -N \\ N & -D \end{pmatrix}, \quad (37)\end{aligned}$$

$$a_{11} = -D \left[1 + \pi_1^{D_1} \cos(N_0 t - \chi_1^{D_1}) + \pi_2^{D_1} \cos(2N_0 t - \chi_2^{D_1}) \right],$$

$$a_{12} = -N \left[1 + \pi_1^{N_1} \cos(N_0 t - \chi_1^{N_1}) + \pi_2^{N_1} \cos(2N_0 t - \chi_2^{N_1}) \right],$$

$$a_{21} = N \left[1 + \pi_1^{N_2} \cos(N_0 t - \chi_1^{N_2}) + \pi_2^{N_2} \cos(2N_0 t - \chi_2^{N_2}) \right],$$

$$a_{22} = -D \left[1 + \pi_1^{D_2} \cos(N_0 t - \chi_1^{D_2}) + \pi_2^{D_2} \cos(2N_0 t - \chi_2^{D_2}) \right],$$

$$b_0 = \begin{pmatrix} b_{01} \\ b_{02} \end{pmatrix}, \quad b_{01} = \gamma_1, \quad b_{02} = \gamma_2,$$

$$b_h = \begin{pmatrix} b_{h1} \\ b_{h2} \end{pmatrix} \quad (h = 1, 2),$$

$$b_{11} = -D\gamma_4, \quad b_{12} = N\gamma_3,$$

$$b_{21} = -N\gamma_3, \quad b_{22} = -D\gamma_4.$$

Векторному стохастическому дифференциальному уравнению (5) отвечают следующие точные нелинейные взаимосвязанные детерминированные уравнения для моментов первого и второго порядка [23]:

$$\dot{m} = am + a_0, \quad m(t_0) = m_0, \quad (38)$$

$$\begin{aligned}\dot{K} &= aK + Ka^T + b_0 \nu b_0^T + \sum_{h=1}^2 (b_h \nu b_h^T + b_0 \nu b_h^T) m_h + \\ &+ \sum_{l,h=1}^2 \sum_{i,h=1}^2 b_h \nu b_i^T (m_h m_l + k_{hl}), \quad K(t_0) = K_0, \quad (39)\end{aligned}$$

$$\frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} = K(t_1, t_2) a_{t_2}^T,$$

$$\begin{aligned}K(t_1, t_2) &= K(t_1) \quad \text{при } t_1 < t_2, \\ K(t_1, t_2) &= K(t_2, t_1)^T \quad \text{при } t_2 < t_1.\end{aligned} \quad (40)$$

Суждение об устойчивости метода в среднем и в среднеквадратичном можно сделать на основе

анализа устойчивости уравнений в вариациях для (38) и (39):

$$\delta \dot{m} = a \delta t, \\ \delta \dot{K} = a \delta K + \delta K a^T + \sum_{l,h=1}^n \sum_{k=1}^n b_h \nu b_l^T k_{hl}.$$

Моментные уравнения (38)–(40) лежат в основе базового параметрического корреляционного метода построения аналитических информационных моделей флуктуаций полюса Земли. Уравнения (38)–(40) вследствие высокой добротности системы позволяют провести переход к укороченным уравнениям согласно [22]. Метод допускает обобщение на случай, когда возмущения V_1, V_2, X_3, X_4 имеют несколько независимых источников.

При практическом применении метода, когда исходные уравнения понимаются в смысле Стратоновича, следует иметь в виду, что в общем случае a_0 и a будут содержать дополнительные члены, зависящие от интенсивности белых шумов [9–11].

Из базовых моментных уравнений (38)–(40), в случае задания возмущений стохастическими каноническими представлениями, выводятся соответствующие уравнения для математических ожиданий и координатных функций, составляющих основу соответствующей версии метода параметрического корреляционного построения аналитических моделей.

Приведем тестовый пример использования базового метода из состава информационных ресурсов по проблеме «Статистическая динамика вращения Земли».

8 Пример 4. Стационарные стохастические параметрические колебания полюса Земли при отсутствии аддитивных постоянных и гармонических возмущений

Полагая в (38) и (39) $M_{i0} = 0, M_j^i = 0 (i, j = 1, 2), \nu = \nu^*, \dot{m}^* = 0, \dot{K}^* = 0$, по формулам (36) и (37) находим $a_0 = 0, a = \langle a \rangle$. Следовательно, стационарные значения $m^* = 0, a K^* = [k_{ij}]$ определяются из уравнения

$$\langle a \rangle K^* + K^* \langle a \rangle^T + b_0 \nu^* b_0^T + \nu^* \sum_{l,h=1}^2 \sum_{k=1}^2 b_h b_l^T k_{hl}^*.$$

Процесс установления стационарных стохастических колебаний в силу (38) и (39) описывается следующими уравнениями:

$$\dot{k}_{11} = -2D \left(1 - \frac{\nu D \gamma_4^2}{2} \right) k_{11} + \nu N^2 \gamma_3^2 k_{22} - 2N (1 - \nu D \gamma_3 \gamma_4) k_{12} + \nu \gamma_1^2,$$

$$\dot{k}_{12} = N (1 - \nu D \gamma_3 \gamma_4) k_{11} - N (1 - \nu D \gamma_3 \gamma_4) k_{22} - 2D \left[1 - \frac{\nu}{2D} (N^2 \gamma_3^2 - D^2 \gamma_4^2) \right] k_{12},$$

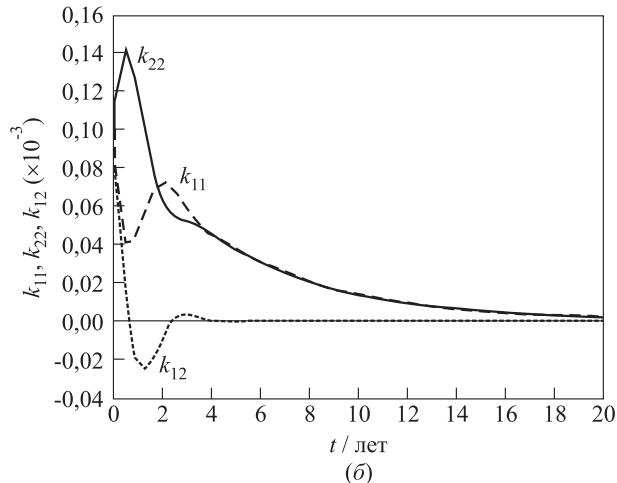
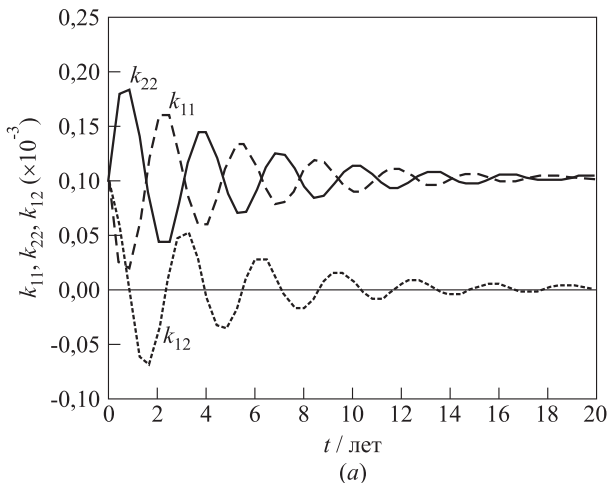


Рис. 3 Зависимости дисперсий k_{11}, k_{22} и ковариации k_{12} от времени при (а) стохастических аддитивных и параметрических гироскопических возмущениях и (б) стохастических аддитивных и параметрических диссипативных возмущениях

$$\dot{k}_{22} = \nu N^2 \gamma_3^2 k_{11} - 2D \left(1 - \frac{\nu D \gamma_4^2}{2}\right) k_{22} + 2N(1 - \nu D \gamma_3 \gamma_4) k_{12} + \nu \gamma_2^2. \quad (41)$$

Влияние стохастических параметрических возмущений проявляется как посредством снижения эффективных коэффициентов моментов сил диссипации D и моментов гироскопических сил N , так и в результате появления дополнительного члена с k_{22} в первом и члена с k_{11} во втором уравнении (41).

На рис. 3 приведены графики установления стационарных параметрических стохастических колебаний полюса Земли.

9 Заключение

Разработанные базовые корреляционные методы построения аналитических информационных моделей флуктуаций полюса Земли по априорным данным реализованы в виде экспериментального программного обеспечения в среде MATLAB.

Как показали проведенные вычислительные эксперименты, базовый квазилинейный метод требует составления $Q_{\text{КЛМ}} = (n + 2)(n + 5)/2$, где n — число учитываемых возмущений, определяемых линейным формирующим фильтром первого порядка. Уравнения (10), (18) и (19) нелинейны относительно m и K . Метод допускает обобщение и на негауссовские случайные возмущения.

Базовый метод параметрического корреляционного построения предполагает составление $Q_{\text{ПКМ}} = 2 \cdot 5/2 = 5$ уравнений. Уравнения (38) и (40) линейны относительно m и $K(t_1, t_2)$, а (39) — относительно k_{ij} , но нелинейны относительно m_i . Уравнения (38)–(40) справедливы только для линейных стохастических уравнений с параметрическими и аддитивными возмущениями типа нормального (понимаемых в смысле Ито) белого шума. Метод допускает обобщение на негауссовские белые шумы. В практических задачах могут быть использованы комбинированные версии.

Среди направлений дальнейшего развития методов построения аналитических информационных моделей флуктуаций полюса Земли следует выделить:

- быстрые off-line методы построения моделей по апостериорным данным;
- оперативные on-line методы построения моделей на основе фильтров Калмана и Пугачева и др. [24, 25].

Автор выражает благодарность Н. Н. Семендяеву за помощь в выполнении расчетов.

Литература

1. Манк Н., Макдональд Г. Вращение Земли. — М.: Мир, 1964.
2. Мориц Г., Мюллер А. Вращение Земли: теория и наблюдение. — Киев: Наук. думка, 1992.
3. IERS Annual Reports, 2000, 2001, 2002 (Frankfurt am Mein: BKG. 2001–2003).
4. Акуленко Л. Д., Кумакшев С. А., Марков Ю. Г., Рыжкова Л. В. Гравитационно-приливной механизм колебаний полюса Земли // Астрон. журн., 2005. Т. 82. № 10. С. 950–960.
5. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Стохастическая модель движения полюса деформируемой Земли // ДАН, 2002. Т. 385. № 2. С. 186–192.
6. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Флуктуационно-диссипативная модель движения полюса деформируемой Земли // ДАН, 2002. Т. 387. № 4. С. 482–486.
7. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Нелинейные стохастические корреляционные модели движения полюса деформируемой Земли // Астрон. журн., 2003. Т. 80. № 2. С. 186–192.
8. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Распределение флуктуаций движения полюса Земли // ДАН, 2003. Т. 390. № 3. С. 343–346.
9. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Многомерные распределения флуктуаций полюса Земли // ДАН, 2003. Т. 391. № 2. С. 194–198.
10. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Спектрально-корреляционные модели флуктуаций вращательного движения Земли // ДАН, 2003. Т. 393. № 5. С. 618–623.
11. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Спектрально-корреляционные и кинетические модели движения Земли // Астрон. журнал, 2004. Т. 81. № 2. С. 184–192.
12. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Влияние параметрических флуктуационно-диссипативных сил на движение полюса Земли // ДАН, 2004. Т. 395. № 1. С. 51–54.
13. Сеницын И. Н. Стохастические модели флуктуаций движения Земли в условиях пуассоновских возмущений // Системы и средства информатики. Спец. вып. Геоинформационные технологии. — М.: ИПИ РАН, 2004. С. 39–55.
14. Марков Ю. Г., Дасаев Р. Р., Перепелкин В. В., Сеницын И. Н., Сеницын В. И. Стохастические модели вращения Земли с учетом влияния Луны и планет // Космические исследования, 2005. Т. 43. № 1. С. 54–66.
15. Сеницын И. Н. Стохастические информационные модели негауссовских флуктуаций движения полюса Земли // Системы и средства информатики. Спец. вып. «Научно-методические проблемы информатики». — М.: ИПИ РАН, 2006. С. 157–178.

16. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Чандлеровские колебания движения полюса Земли // ДАН, 2006. Т. 407. С. 485–488.
17. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Флуктуации чандлеровских колебаний полюса Земли // ДАН, 2006. Т. 409. № 1. С. 48–51.
18. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Чандлеровские колебания полюса Земли при параметрических возмущениях // ДАН, 2006. Т. 410. № 4. С. 1–3.
19. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Спектрально-корреляционная модель флуктуаций чандлеровских колебаний полюса Земли // Астрон. журн., 2006. Т. 83. № 10. С. 950–960.
20. Марков Ю. Г., Перепелкин В. В., Сеницын И. Н., Корепанов Э. Р., Хоанг Тхо Ши. Амплитудно-частотный анализ чандлеровских колебаний полюса Земли // Космические исследования, 2007. № 6.
21. Марков Ю. Г., Сеницын И. Н. Стохастическая модель колебаний полюса Земли с параметрическими возмущениями // ДАН, 2007. Т. 417. № 1. С. 1–4.
22. Сеницын И. Н. Обукороченных моментных уравнениях статистической динамики движения полюса Земли // Системы и средства информатики. Спец. вып. «Математические модели в информационных технологиях». — М.: ИПИ РАН, 2006. С. 24–46.
23. Пугачев В. С., Сеницын И. Н. Теория стохастических систем. 2-е изд. — М.: Логос, 2004.
24. Сеницын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева. 2-е изд. — М.: Логос, 2007.
25. Сеницын И. Н. Развитие теории фильтров Пугачева для оперативной обработки информации в стохастических системах // Информатика и её применения, 2007. Т. 1. Вып. 1. С. 3–13.

КОНСТРУИРОВАНИЕ КАНОНИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ*

В. Н. Захаров¹, Л. А. Калиниченко², И. А. Соколов³, С. А. Ступников⁴

Аннотация: Рассматривается проблема унификации неоднородных моделей представления информации (баз данных, онтологий, сервисов, процессов) при проектировании распределенных информационных систем с разнородными информационными ресурсами. Особое внимание уделено верифицируемым методам отображения информационных моделей и синтеза расширяемых канонических информационных моделей. Предложена архитектура Унификатора информационных моделей и дан пример отображения конкретной информационной модели в каноническую. Дано сравнение предложенных методов с известными подходами в мировой практике.

Ключевые слова: информационная модель; семантика информационной модели; отображение моделей; коммутативность отображения модели; каноническая модель; синтез канонической модели; расширение канонической модели; принцип уточнения; верификация уточнения моделей; унификатор информационных моделей; метакомпиляция

1 Введение

Статья посвящена изучению, трансформации и унификации моделей представления информации в процессе проектирования и разработки интегрированных, интероперабельных информационных систем. Это важная проблема информатики как науки, изучающей естественные и искусственные информационные процессы. С нарастающей интенсивностью информатику рассматривают как естественную науку [1] (наряду с другими естественными науками), а не как науку, изучающую лишь сущности, искусственно созданные человеком. Информационные процессы являются частью природных явлений: примеры таковых общеизвестны в молекулярной биологии, квантовой физике, в экономике, в социальных процессах и пр. Информатика, таким образом, изучает как естественные, так и искусственные информационные процессы. Понимаемая широко (как computing [2]), информатика включает вычислительную науку (computer science), компьютерную инженерию и инженерию программ, информационные технологии (ИТ), информационную науку (information science), инженерию информационных систем. Трактовка информатики как естественной науки приводит к

необходимости ее описания в терминах фундаментальных принципов, которые вскрывали бы глубинные структуры этой науки и показывали, как их можно применить в других областях. К основным категориям таких принципов (важных в контексте настоящей статьи) относятся [2]:

- **категория вычислений**, рассматриваемых как последовательности трансформаций представлений информации в разнообразных информационных моделях;
- **категория координации** (например, кооперации сетевых агентов), рассматриваемой как интероперабельность (совместная работа) совокупности агентов в рамках конечных или бесконечных деятельностей (координируемых протоколами) для достижения некоторой общей цели. Задачи (работы), возникающие при координации, могут быть делегированы вычислительным процессам. При координации агенты обмениваются информацией, представленной в разнообразных информационных моделях;
- **категория запоминания** (хранение и извлечение информации), реализуемого системами хране-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 06-07-08072-офи-а) и программы ОИТВС РАН «Фундаментальные основы информационных технологий и систем» (проект 1-10).

¹Институт проблем информатики Российской академии наук, vzhakharov@ipiran.ru

²Институт проблем информатики Российской академии наук, leonidk@synth.ipi.ac.ru

³Институт проблем информатики Российской академии наук, isokolov@ipiran.ru

⁴Институт проблем информатики Российской академии наук, ssa@ipi.ac.ru

ния информации, представляемой в той или иной информационной модели.

Собственно, эти категории являются основополагающими для описания информационных процессов, а модели представления информации (или информационные модели) составляют их базис. Настоящая работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 06-07-08072-офи-а (проекты конкурсов РФФИ *офи* (ориентированные фундаментальные исследования) имеют целью дальнейшее продвижение тех ранее поддержанных в научных организациях фундаментальных исследований, в ходе работы над которыми исследователи обнаружили возможность использования результатов при создании новых технологий, материалов и услуг). Поэтому она скорее является прагматической, нежели теоретической или тем более философской. Вышесказанное позволяет, однако, определить место данных исследований и разработок в контексте информатики как науки об информационных процессах.

Известно (разработано) большое число моделей представления информации как природных, так и искусственно созданных. Природные информационные модели для изучения преобразуются в искусственные модели, реализуемые на компьютере. Поэтому в дальнейшем статья будет сосредоточена на искусственных моделях (соответствие естественных моделей искусственным можно проследить на примере биологических моделей [4, 3], астрономических моделей [6, 5] и др.; существенно, что одной природной модели, как правило, соответствует значительное число искусственных моделей, с той или иной степенью подробности отражающих ее семантику). Следует оговориться, что под информационными моделями понимаются языки для описания структуры информации, ее семантики, а также операций, определяющих характерные преобразования информации в такой модели. Модель ДНК служит примером подобного языка в молекулярной биологии. Он позволяет описывать общие генетические модели, представления конкретных структур (генов) и содержит специальные операции трансформации таких структур. Отображения модели ДНК в разнообразные искусственные компьютерные информационные модели активно изучались, например, в [4].

В различных областях науки (как и в различных областях деятельности людей вообще) наблюдается экспоненциальный рост объема накапливаемых экспериментальных (наблюдательных) данных, оформляемых в виде информационных ресурсов, каждый из которых представлен средствами определенной информационной модели. Настоящий период развития ИТ характеризуется взрыво-

подобным процессом создания информационных моделей. Это развитие происходит как в рамках конкретных инфраструктур (таких как архитектуры OMG, в частности архитектура CORBA, архитектуры, движимые моделями представления информации (MDA), архитектуры семантического Веба, сервис-ориентированные архитектуры, архитектуры электронных библиотек, архитектуры информационных грид систем), так и в стандартах конкретных информационных моделей — моделей данных (таких как, например, ODMG 2000, SQL 2003, UML, стеки XML и RDF моделей данных), моделей потоков работ (например, Staffware, COSA, InConcert, Eastman, FLOWer, Domino, Meteor, Mobile, MQSeries, Forte, Verve, Vis. WF, Changeng, IFlow, SAP/R3), языков процессной композиции сервисов (XPDL, BPEL4WS, BPML, XLANG, WSFL, WSCI), семантических моделей (включая онтологические модели и модели метаданных), моделей цифровых репозиториях данных и знаний в конкретных областях бизнеса, торговли, науки и многих других. Основу названных моделей составляют разнообразные понятия и парадигмы, не совместимые между собой. Этот процесс сопровождается другой тенденцией — накоплением использующих подобные модели информационных ресурсов, число которых экспоненциально растет. Такой рост вызывает все увеличивающуюся потребность совместного использования (интеграции) модельно неоднородных информационных компонентов и сервисов в различных применениях, а также их повторного использования и композиции для реализации интероперабельных информационных систем [7]. Указанные тенденции противоречивы: чем больше разнообразие применяемых моделей в различных ресурсах, тем более сложными становятся проблемы их интеграции и композиции. Эти тенденции не новы, но с течением времени разнообразие моделей (величина «Вавилонской башни» моделей) и их сложность растут вместе с ростом потребности достижения интеграции и композиции разномодельных компонентов и сервисов при решении задач. Предел возможности интеграции и композиции ресурсов близок к достижению: уже сейчас зачастую проще создать новый ресурс, чем найти и правильно применить существующий.

Масштабы конструирования интероперабельных систем или систем интеграции разнородных информационных ресурсов (далее для краткости И-систем) для решения задач в разнообразных областях государственного управления, производства, бизнеса, науки и культуры огромны и продолжают быстро расти. То, что и интероперабельные системы, и системы интеграции разнородных ресурсов объединены здесь под общим названи-

ем И-системы, не случайно. Интероперабельность означает совместную работу ресурсов при решении конкретной задачи. Для этого нужно, чтобы композиция ресурсов, выполняющих совместную работу, семантически реализовывала части именно этой задачи [8]. При интеграции неоднородных ресурсов нужно уметь семантически отождествлять объекты, представленные в различных информационных моделях, и семантически правильно отображать схемы интегрируемых ресурсов в глобальную схему. Поскольку в общем случае ресурсы неоднородны (представлены в различных моделях), при создании как интероперабельных систем, так и систем интеграции неоднородных ресурсов для однородного представления их семантики требуется приведение различных информационных моделей к унифицированному виду в рамках некоторой унифицирующей информационной модели, которая называется *канонической*.

Вместе с тем применяемые методологические и технологические приемы создания И-систем не обладают необходимыми даже минимальными средствами унифицированного описания семантики разнородных компонентов и поэтому малоэффективны. Как уже было показано, проблемы конструирования И-систем порождаются различием моделей (синтаксиса и семантики языков) представления информационных ресурсов, подлежащих интеграции или композиции в составе И-системы. В такие модели входит и язык, на котором выражается спецификация требуемой (будущей) системы. Такие языки перекрывают широкий спектр средств моделирования информации, включая структуры (типы) данных и их семантику, алгоритмы вычислительных функций и методов, спецификации одновременных процессов (потоков работ).

Процессы интеграции или композиции ресурсов при конструировании И-систем оказываются неосуществимыми при попытке манипулирования разномодельными спецификациями компонентов. Единственный практический выход — приведение разномодельных спецификаций к общей, унифицированной модели. Такое семантическое преобразование разномодельных спецификаций к унифицированному виду в канонической модели нуждается в специальных методах и инструментальных средствах, которых нет в практике проектирования И-систем. Приходится полагаться на интуитивные приемы отождествления спецификаций требуемых ресурсов с заданными свойствами и проводить преобразования информационных моделей вручную, без точного учета семантики используемых моделей и подтверждения правильности выполняемых преобразований. Лишь для простейших

моделей удается получать удовлетворительные результаты. Такая практика, особенно для объектных и процессных моделей, оборачивается дорогостоящим, длительным и малообоснованным процессом получения унифицирующих спецификаций вручную, либо приводит к практической неосуществимости интеграции (композиции) готовых ресурсов.

Следовательно, для эффективного конструирования И-систем требуются специальные методы и инструменты. Для унификации разнородных спецификаций прежде всего требуется умение сопоставлять спецификации различных ресурсов друг с другом так, чтобы можно было отвечать на вопрос, можно ли при реализации И-системы использовать спецификацию существующего ресурса вместо фрагмента спецификации И-системы. Для этого достаточно доказать, что рассматриваемые спецификации находятся в отношении уточнения. Говорят, что спецификация A уточняет спецификацию D , если A можно использовать вместо D так, что пользователь D не будет замечать этой замены. Средства доказательства факта уточнения спецификации некоторого компонента спецификацией другого компонента (реализуемые на основе теоретико-модельных нотаций и соответствующего инструментария) составляют фундамент предлагаемых методов конструирования унифицирующих (канонических) моделей представления информации в И-системах. Каноническая информационная модель служит в качестве общего языка, эсперанто, для адекватного выражения семантики разнородных моделей представления информации, используемых в ресурсах И-системы.

Основной принцип синтеза канонической информационной модели для И-системы состоит в расширяемости ее ядра в разнородной среде, включающей различные информационные модели, используемые для представления ресурсов конкретной И-системы. Ядро канонической модели фиксируется. Для каждой конкретной информационной модели M_i среды определяется расширение ядра канонической модели так, чтобы оно вместе с ядром уточнялось бы моделью M_i . Такая уточняющая трансформация моделей должна быть доказуемо правильной. Каноническая модель среды синтезируется как объединение расширений, образованных для моделей M_i среды.

На протяжении длительного периода времени в лаборатории композиционных методов проектирования информационных систем ИПИ РАН разрабатывались методы синтеза канонических моделей для широкого спектра реальных информационных моделей: структурированных, объектных, сервисных, процессных, включая произвольные их комбинации [9–20]. При этом рассматриваются

полные спецификации моделей (языков), включая средства описания как информационных структур (типов данных), так и поведения (операций, функций и процессов) [14, 15, 21].

При преобразовании структурированных, слабоструктурированных и объектных моделей в каноническую разработанные методы сохраняют информацию и операции в соответствии с принципом уточнения [21]. Отображение процессов при синтезе их канонической модели требует сохранения семантики одновременного поведения (concurrency). В 2004 г. авторы, используя недавно обнаруженную возможность интерпретации процессных событий в формальных методах спецификации [22–25], создали метод конструирования доказательных уточнений процессных спецификаций и синтезировали расширяемую каноническую процессную модель для широкого класса процессных моделей (сотни таких моделей используются в мире только в различных коммерческих системах управления потоками работ), языков процессной композиции веб-сервисов [26]. Этот результат завершил многолетние исследования и позволил достичь совмещения двух практически важных требований — полноты охвата канонической моделью семантики разнообразных требующихся на практике моделей представления информации с доказательностью правильности представления в расширяемой канонической модели разнообразных практически используемых моделей. Эти результаты были опубликованы в [15]. Таким образом, решение многих актуальных практических задач стало более обоснованным (например, конструирование виртуальных организаций, трейдинг процессов или сервисов).

Однако, ввиду взрывоподобного расширения разнообразия информационных моделей, при использовании разработанных методов отображения спецификаций ресурсов в спецификации И-систем и синтеза канонических моделей И-систем и применении теории уточнения невозможно справиться вручную с такой «Вавилонской башней» информационных моделей. Поэтому представляется важным создание Конструктора унифицирующих информационных моделей (Унификатора моделей, для краткости) для автоматизации разработанных методов синтеза канонических моделей при проектировании И-систем. Унификатор позволяет доказательно приводить множество разнотипных

информационных моделей ресурсов к каноническому, унифицированному представлению и реализует стратегически важный этап конструирования И-систем.

Методы конструирования расширяемой канонической информационной модели для И-систем, функции и архитектура Унификатора моделей и пример отображения конкретной информационной модели в каноническую в процессе ее расширения рассматриваются в последующих разделах статьи.

2 Метод конструирования унифицирующих информационных моделей

В данном разделе рассматривается подход к строгому определению информационных моделей и использованию их как формальных объектов в процессе синтеза канонической информационной модели. Каждая информационная модель определяется синтаксисом и семантикой двух языков — языка определения информации, описывающей состояние некоторой системы (информационного ресурса или И-системы), и языка оперирования такими состояниями (информацией, характеризующей состояние). При отображении некоторой информационной модели ресурса (исходной модели) в каноническую информационную модель (целевую) необходимо сохранение информации и операций. Для этого достаточно, чтобы целевая модель уточнялась исходной моделью¹. Установление факта уточнения моделей требует проведения формального доказательства, реализация которого возможна в формальной информационной модели, которая в дальнейшем называется *абстрактной информационной метамоделью*.

Понятие *уточнения моделей данных* определяется следующим образом. Тип данных в исходной модели t_s уточняет тип целевой модели t_t , если и только если они отображаются в две спецификации *абстрактной метамодели данных* так, что образ типа t_s в исходной модели является уточнением образа типа t_t в целевой модели.

Схема системы S_s уточняет схему S_t , если и только если для каждого типа t_s в S_s есть тип t_t в S_t (и S_t не содержит других типов) такой, что t_s является уточнением t_t . Модель данных M_s уточняет

¹Исходная информационная модель M_s эквивалентна целевой информационной модели M_t , если M_t уточняется M_s и M_s уточняется M_t . Для целей создания И-систем достаточно рассматривать уточнение модели M_t моделью M_s . Установление факта эквивалентности моделей при использовании предлагаемого подхода возможно, но является избыточным. Вообще говоря, употребление эквивалентности моделей может определяться видом абстрактной метамодели и техникой построения отображения моделей. Так, в работе [11] при построении отображений моделей в денотационной семантике подтверждалась эквивалентность моделей при их отображении.

модель данных M_t , если и только если для каждой допустимой схемы S_s в M_s существует допустимая схема S_t в M_t такая, что S_s является уточнением S_t .

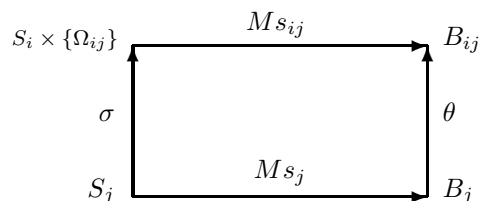
Основные принципы синтеза канонической информационной модели формулируются следующим образом.

Принцип расширения информационных моделей данных. Каноническая модель должна быть расширяемой. Расширение канонической модели происходит при рассмотрении каждой новой исходной модели: целевая модель расширяется путем добавления к ее языку определения информации новых (измененных) типов данных, которые могут быть уточнены определениями типов исходной модели.

Принцип коммутативного отображения информационных моделей. При отображении исходной модели в каноническую необходимо сохранение информации и операций. Это требование достигается, если отображение моделей данных является коммутативным.

Множество всех схем систем, которые могут быть выражены на языке определения информации модели M_i , обозначается S_i . Множество спецификаций абстрактной метамодели, прообразами которых при семантическом отображении являются схемы из S_i , обозначается B_i . Обозначим $M_{S_i} : S_i \rightarrow B_i$ семантическую функцию модели M_i . Отображение $f = \langle \sigma, \theta \rangle$ модели M_j в расширение M_{ij} модели M_i коммутативно, если выполняются следующие условия:

- диаграмма отображения схем языков определения информации является коммутативной:



- отображение θ является уточнением.

Здесь Ω_{ij} обозначает множество новых (модифицированных) типов расширения целевой модели, обеспечивающих конструирование необходимых уточнений типами исходной модели.

Аналогичную диаграмму следует дать для отображения средств языка манипулирования информацией. Однако, поскольку рассматриваемая в работе каноническая модель является объектной, основные операции манипулирования информацией определены в составе типов и классов языка

определения. Это позволяет в данном рассмотрении ограничиться только диаграммой отображения схем.

Принцип синтеза унифицирующей канонической информационной модели. Синтез канонической модели есть процесс построения расширений ядра канонической модели, уточняемых различными информационными моделями ресурсов, включаемыми в среду И-системы, а также процесс слияния этих расширений с канонической моделью. В создаваемой согласно этому принципу унифицирующей канонической модели разнообразные исходные модели имеют однородное представление, уточняемое такими исходными моделями.

2.1 Абстрактная информационная метамодель

В настоящей работе в качестве абстрактной информационной метамодели используется Нотация абстрактных машин (Abstract Machine Notation, AMN). Язык AMN обеспечивает манипулирование теоретико-множественными спецификациями в логике первого порядка и доказательство уточнения спецификаций [27–29]. Специальные инструментальные средства (В-технология [27]) предоставляют возможность доказательства коммутативности диаграмм отображения моделей полуавтоматическим способом: теоремы, требуемые для доказательства уточнения моделей, генерируются средствами В-технологии автоматически, но их доказательство может быть интерактивным.

Язык AMN как теоретико-модельная нотация позволяет рассматривать состояния и операции системы интегрированно как спецификацию пространства состояний и поведения (определенного операциями на состояниях) абстрактных машин. Спецификация состояния абстрактной машины вводится переменными состояниями вместе с инвариантами — ограничениями, которые должны всегда удовлетворяться. Операции определяются на основе расширения формализма охраняемых команд Дейкстры. Ключевым понятием AMN является уточнение, позволяющее соотносить спецификации систем различных уровней абстракции. Уточняющая спецификация может быть значительно более детальной, чем уточняемая спецификация. Конструируется уточняющая спецификация на основе алгоритмического уточнения и уточнения данных [28]. Уточнение формализуется в AMN путем формулировки ряда теорем специального вида, так называемых *proof obligations*. Такие теоремы

формулируются автоматически при помощи инструментальных средств поддержки В-технологии (В-Toolkit [30], AntelierB [31]) на основании *склеивающих инвариантов*, соотносящих состояния уточняемой и уточняющей систем. Теоремы могут быть доказаны при помощи инструментальных средств поддержки автоматического и(или) интерактивного доказательства.

2.2 Спецификация операций в AMN

Операции абстрактных машин основаны на обобщенных подстановках. Любая операция в AMN имеет следующий вид

$$r_1, \dots, r_n \leftarrow op(p_1, \dots, p_m) = S.$$

Здесь op — имя операции, r_1, \dots, r_n — выходные параметры операции, p_1, \dots, p_m — входные параметры операции, S — подстановка, определяющая действие операции на пространстве состояний.

Язык обобщенных подстановок (Generalized Substitution Language, GSL) позволяет описывать переходы между состояниями системы. Каждая обобщенная подстановка S определяет преобразователь предиката, связывающий некоторое постусловие R со своим *слабейшим* предусловием $[S]R$, что гарантирует сохранение R после выполнения операции. В этом случае говорят, что S *устанавливает* R . «Слабейшее» предусловие означает, что предикат «начального состояния», связанный с некоторым предикатом «заключительного состояния», должен разрешать максимально большое число состояний. В табл. 1 рассматриваются основные виды обобщенных подстановок и соответствующие им слабые предусловия. Здесь S, T, T_1, T_2 означают подстановки; x, y, t — переменные; E, F — выражения; G, G_1, G_2, P — предикаты; $P\{x \rightarrow E\}$ — предикат P , в котором все свободные вхождения переменной x заменены на E .

Таблица 1 Обобщенные подстановки и их семантика

Обобщенная подстановка S	$[S]P$
$x := E$	$P\{x \rightarrow E\}$
$skip$	P
$x := E y := F$	$[x, y := E, F]P$
$S T$	$[S]P \wedge [T]P$
SELECT G_1 THEN T_1 WHEN G_2 THEN T_2 END	$(G_1 \Rightarrow [T_1]P) \wedge$ $(G_2 \Rightarrow [T_2]P)$
PRE G THEN T END	$G \wedge [T]P$
ANY t WHERE G THEN T END	$\forall t \bullet (G \Rightarrow [T]P)$
$S ; T$	$[S][T]P$
IF G THEN S ELSE T END	$(G \Rightarrow [S]P) \wedge$ $(\neg G \Rightarrow [T]P)$

2.3 Виды конструкций и структурные механизмы AMN

В AMN существует три вида конструкций:

- (1) *абстрактная машина (abstract machine)*;
- (2) *уточнение (refinement)*;
- (3) *реализация (implementation)*.

Абстрактная машина может быть только уточняемой конструкцией, и при описании операций абстрактной машины не разрешается использовать последовательную и циклическую подстановки. Реализация может быть только уточняемой конструкцией, при описании операций реализации не разрешается использовать недетерминированные подстановки (SELECT, ANY), параллельную подстановку и предусловие. Реализации также не разрешается иметь собственных переменных. Уточнение является более универсальной конструкцией, так как может использоваться как в качестве уточняемой, так и в качестве уточняющей конструкции, язык описания операций уточнения не имеет таких ограничений как в абстрактной машине, так и в реализации. Поэтому конструкция уточнения является наиболее предпочтительной для однородного представления в AMN спецификаций канонической модели.

Уточнение выглядит следующим образом.

```

REFINEMENT  $r$ 
REFINES  $m$ 
SEES  $sm$ 
INCLUDES  $im$ 
SETS  $s$ 
CONSTANTS  $c$ 
PROPERTIES  $P(s, c)$ 
VARIABLES  $x$ 
INVARIANT  $I(x)$ 
INITIALISATION  $S$ 
OPERATIONS  $O_1; \dots; O_n$ 
END
    
```

Уточнение с именем r содержит переменные в разделе VARIABLES, которые и определяют состояние системы. Начальная инициализация переменных определяется подстановкой, определенной в разделе INITIALISATION. Изменять состояние системы могут только операции, определенные в разделе OPERATIONS. Состояние системы должно удовлетворять инварианту после инициализации; операции также должны сохранять инвариант. Раздел SETS содержит определение множеств, раздел CONSTANTS содержит имена констант, используемых в уточнении, раздел PROPERTIES содержит предикат, описывающий свойства констант.

Имя конструкции, которую уточняет r , содержится в разделе REFINES.

Разделы SEES и INCLUDES отвечают за композицию уточнения с другими конструкциями. Композиция SEES используется в случае, если несколькими конструкциям необходимо обеспечить возможность чтения значений переменных, множеств и констант некоторой машины. Композиция INCLUDES используется в ситуации, когда конструкции необходимо использовать другую конструкцию как свою подсистему. Переменные включаемой конструкции становятся переменными включающей конструкции; их изменение может производиться только при помощи операций включаемой конструкции. Инвариант включаемой конструкции становится частью инварианта включающей конструкции.

2.4 Формализация понятия уточнения в AMN

Рассмотрим, каким образом формализуется факт уточнения конструкции M конструкцией N в AMN. Заметим, что факт уточнения может быть установлен только в том случае, если конструкции M и N (табл. 2) *согласованы*, т.е. удовлетворяют следующим требованиям.

- раздел REFINES конструкции N должен содержать имя M ;
- для каждой операции конструкции M конструкция N должна содержать операцию с точно такой же сигнатурой;
- инвариант конструкции N должен содержать так называемый *склеивающий* инвариант (инвариант уточнения) R , задающий соотношение между состояниями уточняемой и уточняющей конструкций.

Таблица 2 Спецификации M и N

REFINEMENT M	REFINEMENT N
REFINES K	REFINES M
CONSTANTS c_M	CONSTANTS c_N
PROPERTIES P_M	PROPERTIES P_N
VARIABLES v	VARIABLES w
INVARIANT I_M	INVARIANT I_N
INITIALISATION $Init_M$	INITIALISATION $Init_N$
OPERATIONS	OPERATIONS
$y \leftarrow op(x) =$	$y \leftarrow op(x) =$
PRE $Pre_{op,M}$	PRE $Pre_{op,N}$
THEN	THEN
$Def_{op,M}$	$Def_{op,N}$
END	END
...	...
END	END

Определение 1. N уточняет M , если верны следующие теоремы (proof obligations):

- **Теорема непустоты объединенного состояния.** Существует объединенное состояние M и N , удовлетворяющее инвариантам M и N :

$$P_M \wedge P_N \Rightarrow \exists(v, w) \bullet (I_M \wedge I_N).$$

- **Теорема уточнения инициализации.** Инициализация N уточняет инициализацию M :

$$P_M \wedge P_N \Rightarrow [Init_N] \neg [Init_M] \neg I_N.$$

- **Теорема уточнения операций.** Каждая из операций N уточняет соответствующую операцию M , т.е. при условии выполнения инварианта уточнения и предусловия уточняемой операции, выполняется предусловие уточняющей операции; и для каждого случая исполнения $Def_{op,N}$ существует исполнение $Def_{op,M}$ из соответствующего начального состояния (задаваемого инвариантом уточнения R), которое устанавливает точно такие же значения выходных параметров и сохраняет инвариант уточнения на постсостояниях:

$$P_M \wedge P_N \wedge I_M \wedge I_N \wedge Pre_{op,M} \Rightarrow Pre_{op,N} \wedge [Def_{op,N}\{y \rightarrow y'\}] \neg [Def_{op,M}] \neg (I_N \wedge y' = y).$$

В целом, для верификации отображения информационной модели M_j в расширение M_i требуется определить AMN-семантику M_j и AMN-семантику расширенной M_i . После этого применяется В-технология, чтобы доказать коммутативность отображения моделей. Это ведет к доказательству того, что M_j является уточнением расширения M_i . Важно, что отображение информационных моделей, основанное на AMN и на технике уточнения, применимо как к структурированным, объектным, онтологическим, так и сервисным и процессным моделям.

3 Архитектура средств конструирования унифицирующих информационных моделей

Целью Унификатора моделей является унификация множества информационных моделей (называемых *исходными*), совместно использующихся в некоторой И-системе. Унификация исходной

модели R есть приведение ее к канонической информационной модели C , т. е. создание такого расширения E канонической модели (которое может быть и пустым) и такого отображения M исходной модели в расширенную каноническую, что исходная модель **уточняет** расширенную каноническую модель. Уточнение моделей означает, что для любой допустимой спецификации r модели R ее образ $M(r)$ при отображении M уточняется спецификацией r . В результате унификации также должна быть получена возможность доказывать уточнение произвольной конкретной спецификацией r модели R ее образа $M(r)$. Верификация уточнения моделей осуществляется на наборе образцов спецификаций исходной модели.

Таким образом, для обеспечения деятельности по унификации информационных моделей необходимы следующие основные языки и формализмы:

- ядро канонической информационной модели;
- формализм, позволяющий описывать синтаксис информационных моделей и специфицировать трансляторы из одной модели в другую;
- формализм, поддерживающий верификацию уточнения.

В качестве ядра канонической информационной модели в настоящей работе рассматривается язык СИНТЕЗ [32], ориентированный на семантическую интероперабельность и композиционное проектирование информационных систем в широком диапазоне существующих неоднородных информационных компонентов.

Для формального описания синтаксиса и трансляторов моделей используются языки метакомпиляции SDF (Syntax Definition Formalism) и ASF (Algebraic Specification Formalism), обеспечивающие инструментальную поддержку Meta-Environment [33].

Для формализации семантики информационных моделей и верификации уточнения используется язык спецификаций AMN, основанный на логике предикатов первого порядка и теории множеств и поддержанный технологией и инструментальными средствами доказательства уточнения (В-технология [27]).

Деятельность по унификации исходной модели R , осуществляемая экспертом при поддержке Унификатора моделей, разбивается на следующие этапы (синтаксис и семантика ядра и существующих расширений канонической модели, а также онтологические аннотации конструкций канонической модели предполагаются определенными):

1. Формализация синтаксиса и семантики модели R .

2. Интеграция эталонных схем модели R и канонической информационной модели.
3. Создание необходимого расширения E канонической модели C .
4. Построение отображения модели R в расширенную каноническую модель.
5. Верификация уточнения моделью R расширенной канонической модели.

Следует отметить, что этап верификации уточнения моделей является достаточно трудоемким и технически сложным и потому может применяться при унификации моделей по требованию.

Рассмотрим более подробно указанные этапы.

1. **Формализация синтаксиса и семантики исходной модели.** Входными данными этого этапа являются синтаксис и семантика модели R , изложенные в некоторых нормативных документах (описаниях соответствующих языков). Синтаксис моделей чаще всего представляется в каком-либо варианте формы Бэкуса–Наура. Семантика модели может быть как вербальной, представленной в виде комментария к синтаксису, так и частично формализованной (например, с использованием логики и теории множеств).

- (a) Определение синтаксиса трансформируется экспертом в язык SDF, и это новое определение считается формальным описанием синтаксиса.
- (b) Семантика модели формализуется экспертом в виде определяемого на языке ASF транслятора модели в язык AMN. Такая формализация необходима для последующей верификации уточнения моделей и может быть опущена, если верификация не является обязательной.

2. **Интеграция эталонных схем исходной и канонической моделей.**

Эталонной схемой информационной модели называется абстрактное описание, содержащее значимые связи между понятиями, соответствующими конструкциям модели. Понятия и связи, составляющие эталонную схему, могут быть аннотированы вербальными определениями.

Целью интеграции эталонных схем является выделение релевантных конструкций исходной и канонической моделей. Входными данными этапа являются SDF-синтаксис исходной модели и ее вербальная семантика.

- (a) Автоматически выполняется построение заготовки эталонной схемы исходной модели

на основе ее формального синтаксиса. **Заготовка эталонной схемы** представляет собой совокупность наименований понятий, соответствующих конструкциям модели, и связей между ними.

- (b) Заготовка эталонной схемы превращается экспертом в собственно *эталонную схему* модели. Эксперт аннотирует составляющие эталонной схемы вербальными определениями, взятыми из документов, описывающих вербальную семантику модели. Эксперт может уточнить автоматически порожденную заготовку, добавив или удалив новые элементы или связи между ними.
- (c) На основе вербальных определений автоматически порождаются векторы дескрипторов элементов эталонной схемы, с использованием векторной модели производится поиск элементов эталонной схемы канонической модели, близких к элементам эталонной схемы исходной модели (эталонная схема канонической модели при этом предполагается построенной). Эксперт подтверждает либо отвергает найденные соответствия, а также добавляет соответствия, не найденные автоматически. Результатом интеграции является список соответствий конструкций исходной и канонической моделей. Одной конструкции канонической модели может соответствовать несколько конструкций исходной модели (и наоборот).

3. **Создание расширения канонической модели.** К необходимости создания расширения эксперт приходит в процессе интеграции эталонных схем исходной и канонической моделей: обнаруживается, что средств ядра (или ядра с уже построенными расширениями) канонической модели недостаточно для выражения некоторых конструкций исходной модели. К этому выводу эксперт приходит, если:

- между конструкциями исходной модели и конструкциями канонической модели алгоритмы интеграции не установили связей;
- на основе анализа документов, описывающих синтаксис и семантику исходной и канонической модели сделано экспертное заключение о невыразимости конструкций исходной модели в канонической.

При создании расширения для канонической модели предполагаются определенными:

- документы, описывающие синтаксис и семантику;

- формальный SDF-синтаксис;
- AMN-семантика (т. е. вербальные правила и инструментальные средства отображения в язык AMN);
- онтологическое описание.

Для исходной модели необходимо обеспечить:

- документы, описывающие синтаксис и семантику;
- формальный SDF-синтаксис;
- AMN-семантику;
- эталонную схему модели;
- установленные автоматически или с помощью эксперта и подтвержденные экспертом соответствия элементов исходной и канонической моделей;
- неформальное определение отображения тех конструкций исходной модели в конструкции канонической, для которых установлено соответствие.

Для создания расширения эксперту могут понадобиться все вышеперечисленные данные:

- (a) Создание расширения эксперт начинает с определения названия расширения и расширяемой версии канонической модели (т. е. выбирает расширяемую версию из списка).
- (b) Дальнейшая деятельность эксперта заключается в итеративном редактировании синтаксиса расширения и вербальной семантики (включая правила отображения AMN). При этом эксперт обращается к описаниям исходной и канонической моделей, к интерфейсу интеграции эталонных схем моделей. Одновременно эксперт осуществляет дополнение вербального описания отображения исходной модели в каноническую для недостающих конструкций.
- (c) После того как вербальное отображение исходной модели в каноническую полностью определено и зафиксированы абстрактный синтаксис расширения и вербальная семантика, для расширения создается эталонная схема (этапы 2a, 2b).
- (d) Далее уточняется картина интеграции эталонных схем исходной модели и расширенной канонической модели: устанавливаются и фиксируются соответствия между конструкциями исходной модели и конструкциями расширения.

4. **Построение отображения исходной модели в расширенную каноническую модель.** Входными данными этапа являются список соответствий конструкций исходной и канонической моделей, SDF-синтаксис и вербальная семантика исходной и канонической моделей.

- (a) Эксперт разрабатывает неформальные правила отображения исходной модели в расширенную каноническую.
- (b) Автоматически генерируется **заготовка ASF-транслятора** исходной модели в расширенную каноническую. Заготовка строится на основе информации, содержащейся в списке соответствий элементов исходной и канонической моделей и SDF-синтаксисах моделей.
- (c) Эксперт формализует вербальные правила отображения, превращая автоматически порожденную заготовку транслятора в полноценный ASF-транслятор исходной модели в каноническую.

5. **Верификация уточнения исходной моделью расширенной канонической модели.** Верификация уточнения осуществляется на наборе образцов спецификаций исходной модели. Желательно, чтобы образец являлся достаточно характерной спецификацией исходной модели (типовой конструкцией). Примерами могут служить образцы потоков работ (workflow patterns) [34], использованные для синтеза канонической процессной модели [15]. В случае, когда для модели затруднительно выделить образцы, верификация может быть проведена для используемых при конструировании И-системы конкретных схем в исходной модели.

Идея верификации уточнения образцом S исходной модели его образа CS при отображении в каноническую модель состоит в следующем: образец S и его образ CS отображаются в язык AMN, и уточнение доказывается средствами В-технологии для соответствующих AMN-спецификаций. Уточнение AMN-спецификаций будет свидетельствовать об уточнении образцом S его образа CS .

- (a) Экспертом выделяются образцы исходной модели, строятся их спецификации S_i и проверяются на соответствие формальному синтаксису.
- (b) С использованием транслятора исходной модели в AMN, полученного на этапе 1b, автоматически порождаются AMN-спецификации S_i^{AMN} образцов.

- (c) С использованием полученного на этапе 4с транслятора исходной модели в каноническую автоматически порождаются канонические спецификации CS_i образцов.
- (d) С использованием транслятора канонической модели в AMN [18], автоматически порождаются канонические AMN-спецификации CS_i^{AMN} образцов.
- (e) Экспертом с использованием средств В-технологии автоматически и/или интерактивно доказываются уточнение спецификациями S_i^{AMN} спецификаций CS_i^{AMN} . Текст доказательств фиксируется.

Рассмотрим архитектуру Унификатора моделей (рис. 1) и то, каким образом компоненты архитектуры поддерживают различные этапы деятельности эксперта по унификации моделей. На рисунке пунктирные стрелки обозначают доступ из одного компонента к интерфейсу другого компонента.

Унификатор состоит из следующих крупных компонентов (групп компонентов):

- Meta-Environment (для определения и проверки корректности синтаксиса моделей и трансляторов моделей);
- В-Toolkit (поддерживающий язык AMN и средства доказательства уточнения спецификаций);
- репозиторий метаинформации;
- менеджер моделей.

Meta-Environment и В-Toolkit представляют собой самостоятельные продукты. Meta-Environment поддерживает следующие этапы унификации моделей: формализация синтаксиса и семантики исходной модели (этап 1), формализация синтаксиса расширения канонической модели (этап 3b), формализация вербальных правил отображения исходной модели в каноническую и построение транслятора моделей на основе автоматически сгенерированной заготовки (этап 4с), проверка образцов исходной модели на соответствие формальному синтаксису (этап 5a). В-Toolkit поддерживает этап 5e автоматического и интерактивного доказательства уточнения спецификаций.

Репозиторий метаинформации представляет собой объектно-реляционную базу данных и предназначен для реализации **реестра моделей** и хранения спецификаций. Реестр моделей (или просто **реестр**) содержит **регистрационные карты** моделей, расширений канонической модели, образцов. В регистрационных картах сохраняется вся информация, порождаемая в ходе унификации моделей (в том числе и информация, порождаемая в ходе взаимодействия эксперта с компонентами Meta-Environment и В-Toolkit).

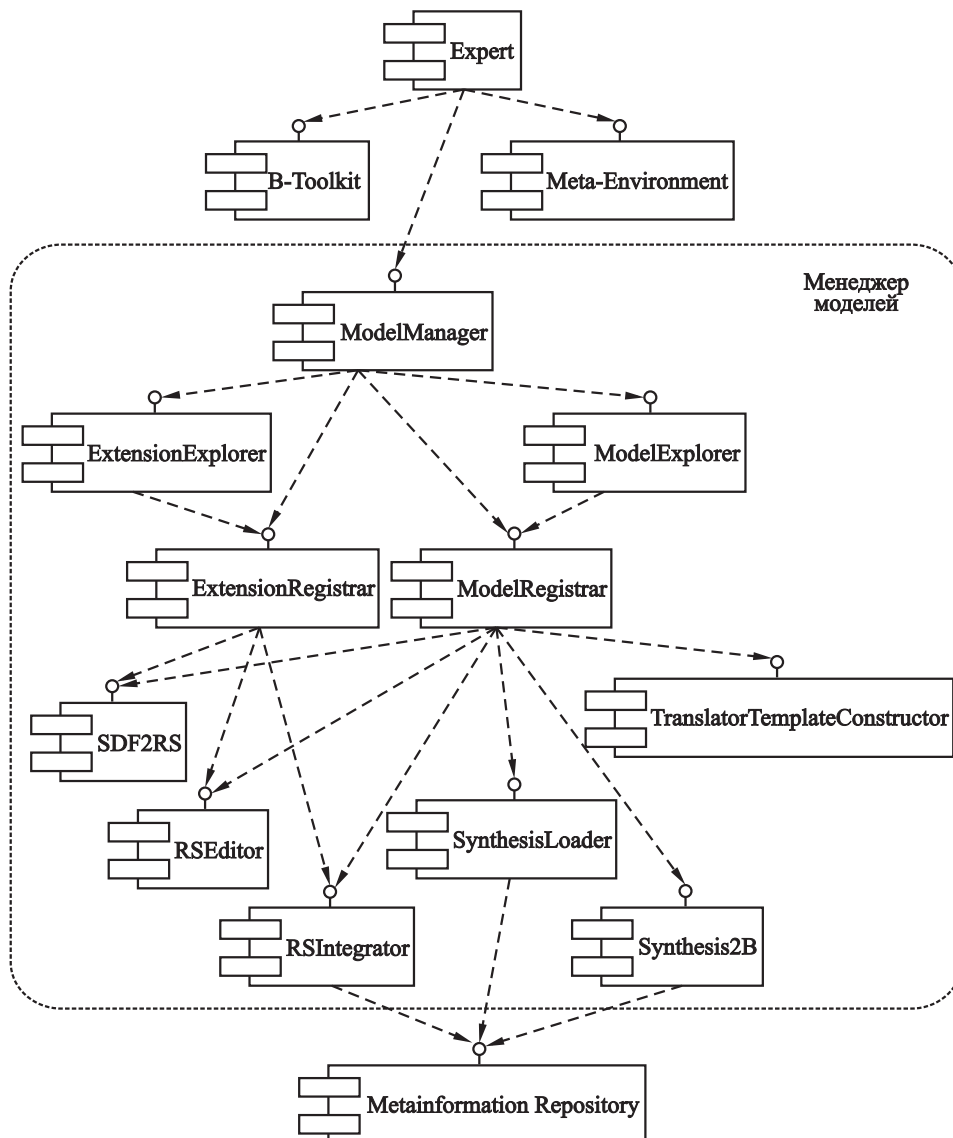


Рис. 1 Архитектура Унификатора моделей

В качестве примера приведем список данных, составляющих регистрационную карту информационной модели:

- название модели (краткое, полное);
- синтаксис модели:
 - название документа, описывающего синтаксис (стандарт, заявка и т. д.);
 - дата документа;
 - ссылка на документ (URI);
 - формальный SDF-синтаксис модели;
- семантика модели:
 - название документа, описывающего семантику;
 - дата документа;
 - ссылка на документ (URL);
 - вербальные правила отображения модели в AMN (текстовый файл);
 - спецификация ASF-транслятора модели в AMN;
- спецификация заготовки эталонной схемы модели;
- спецификация эталонной схемы модели;
- список регистрационных карт примеров модели;
- ссылка на расширение канонической модели, с которым интегрируется модель;

- соответствие элементов исходной и канонической моделей;
- вербальные правила отображения модели в каноническую;
- спецификация ASF-транслятора модели в каноническую.

Все остальные компоненты Унификатора объединены в группу, называемую *менеджер моделей*.

Компонент *ModelManager* предоставляет графический интерфейс, позволяющий эксперту подключиться к конкретному репозиторию метаданных, а также вызвать компоненты, которые обеспечивают:

- поиск информационной модели в реестре;
- регистрацию новой модели в реестре;
- просмотр расширений, зарегистрированных в реестре;
- регистрацию нового расширения канонической модели в реестре.

Компонент *ModelExplorer* предоставляет графический интерфейс, позволяющий производить поиск модели в реестре по полному или краткому названию модели, названиям или ссылкам на документы, описывающие синтаксис или семантику модели.

Компонент *ExtensionExplorer* предоставляет графический интерфейс, позволяющий просматривать названия и вербальные описания зарегистрированных расширений канонической модели.

Компонент *ModelRegistrar* предоставляет графический интерфейс, позволяющий просматривать и редактировать регистрационные карты моделей и их образцов, содержащихся в реестре.

Компонент *ExtensionRegistrar* предоставляет графический интерфейс, позволяющий просматривать и редактировать регистрационные карты расширений канонической модели, содержащихся в реестре.

Компонент *SDF2RS* (SDF to Reference Schema) обеспечивает автоматическое построение заготовки эталонной схемы исходной модели (этап 2а) или расширения (этап 3с) на основе их формального синтаксиса.

Компонент *RSEditor* (Reference Schema Editor) предоставляет графический интерфейс, позволяющий превратить заготовку эталонной схемы модели (этап 2b) или расширения (этап 3с) в собственно эталонную схему.

Компонент *RSIntegrator* (Reference Schema Integrator) обеспечивает поддержку интеграции эталонных схем исходной модели и канонической модели (этап 2с) или расширения канонической модели (этап 3d).

Компонент *SynthesisLoader* обеспечивает помещение эталонных схем моделей (этапы 2b, 3с) и спецификаций образцов моделей в репозиторий метаданных (этап 5с).

Компонент *TranslatorTemplateConstructor* обеспечивает автоматическую генерацию заготовки ASF-транслятора исходной модели в каноническую (этап 4b).

Компонент *Synthesis2B* обеспечивает автоматическое отображение спецификаций канонической модели в язык AMN (этап 5d).

4 Пример отображения исходной информационной модели в каноническую

В этом разделе рассматривается пример отображения в каноническую модель фрагмента модели OWL (Web Ontology Language, [35]) — языка семантической разметки для публикации и совместного использования онтологий в Веб.

4.1 Формализация синтаксиса OWL

Синтаксис и семантика OWL описаны в документе [36]. Заметим, что в этом документе описан не XML-синтаксис, а **абстрактный** синтаксис, независимый от XML представления.

Синтаксис представлен в версии расширенной формы Бэкуса–Наура, правила которой имеют следующий вид:

```
axiom ::= ... |
  'ObjectProperty(' propertyID
  ['Deprecated'] { annotation }
  {'super(' propertyID ')'}
  ['inverseOf(' propertyID ')']
  ['Symmetric']
  [ 'Functional' | 'InverseFunctional' |
  'Functional' 'InverseFunctional' |
  'Transitive' ]
  { 'domain(' classID ') ' }
  { 'range(' classID ') ' } )'
```

Здесь символ ::= разделяет голову и тело правила, вертикальная черта (|) означает альтернативу, опциональные части правила заключаются в квадратные скобки [], повторяющиеся части заключаются в фигурные скобки { }.

Первым этапом унификации модели является преобразование исходного синтаксиса в формальный SDF-синтаксис:

```

module unifier/owl/OWL-Syntax

sorts
  Axiom ObjectPropertyAxiom ...

context-free syntax
  ObjectPropertyAxiom -> Axiom

"ObjectProperty" "(" PropertyID
  ("Deprecated")? Annotation*
  SuperProperty* InverseOf?
  ("Symmetric")? PropertyKind?
  ObjectPropertyDomain*
  ObjectPropertyRange* ")"
-> ObjectPropertyAxiom
    
```

Как можно видеть, формальный синтаксис OWL образует SDF-модуль *OWL-Syntax*, включающий раздел сортов (куда попадают все нетерминальные символы синтаксиса) и раздел контекстно-свободного синтаксиса (включающий правила). Разделителем в правилах SDF является символ \rightarrow , голова правила располагается справа от разделителя, тело — слева. Опциональные части правил помечаются знаком вопроса $?$, повторяющиеся части — знаком $*$.

При формализации в синтаксисе могут появиться новые нетерминальные символы, детализирующие синтаксис и помогающие избавиться от недетерминизма при программной обработке. Так, аксиома объектного свойства (*ObjectProperty*) в SDF-синтаксисе OWL была выделена в отдельный сорт, и для нее было образовано отдельное правило.

4.2 Формализация семантики OWL в языке AMN

Формализация семантики заключается в построении ASF-транслятора, отображающего спецификации OWL в спецификации AMN. В данном разделе будут кратко проиллюстрированы принципы отображения OWL в AMN на примере онтологии вин:

```

Class(Wine
  restriction(hasColor cardinality(1))
  restriction(hasFlavor cardinality(1))
  restriction(hasSugar cardinality(1)))
Class(IceWine
  restriction(hasFlavor
    allValuesFrom(oneOf(Strong Moderate))))
Class(DessertWine
  restriction(hasSugar
    allValuesFrom(oneOf(OffDry Sweet))))
EquivalentClasses(IceWine
    
```

```

  intersectionOf(DessertWine
    restriction(hasColor value(White))))
ObjectProperty(hasColor
  domain(Wine) range(WineColor))
ObjectProperty(hasFlavor
  domain(Wine) range(WineFlavor))
ObjectProperty(hasSugar
  domain(Wine) range(WineSugar))
EnumeratedClass(WineColor White Rose Red)
EnumeratedClass(WineFlavor
  Delicate Moderate Strong)
EnumeratedClass(WineSugar
  Sweet OffDry Dry)
    
```

Основной класс онтологии — *Wine*, подклассами его являются *IceWine* и *DessertWine*. Вино характеризуется цветом (свойство *hasColor*), вкусом (*hasFlavor*) и содержанием сахара *hasSugar*. *IceWine* — это белое десертное вино с сильным или средним вкусом.

Образом при отображении данной онтологии в AMN является конструкция *Wines*:

REFINEMENT *Wines*

SETS *Ind*;

WineColor = {*White, Rose, Red*};

WineFlavor = {*Delicate, Moderate, Strong*};

WineSugar = {*Sweet, OffDry, Dry*}

VARIABLES

Wine, IceWine, DessertWine,

hasColor, hasFlavor, hasSugar

INVARIANT

$Wine \in POW(Ind) \wedge IceWine \in POW(Ind) \wedge$

$DessertWine \in POW(Ind) \wedge$

$DessertWine \subseteq Wine \wedge$

$hasColor \in Wine \leftrightarrow WineColor \wedge$

$\forall wine.(wine \in Wine \Rightarrow$

$card(hasColor[\{wine\}]) = 1) \wedge$

$hasFlavor \in Wine \leftrightarrow WineFlavor \wedge$

$\forall wine.(wine \in Wine \Rightarrow$

$card(hasFlavor[\{wine\}]) = 1) \wedge$

$hasSugar \in Wine \leftrightarrow WineSugar \wedge$

$\forall wine.(wine \in Wine \Rightarrow$

$card(hasSugar[\{wine\}]) = 1) \wedge$

$ran(IceWine \triangleleft hasFlavor) =$

$\{Strong, Moderate\} \wedge$

$ran(DessertWine \triangleleft hasSugar) =$

$\{OffDry, Sweet\} \wedge$

$IceWine = DessertWine \cap$

$\{x | x \in dom(hasColor) \wedge hasColor(x) = White\}$

OPERATIONS

include_Wine(ind) = ...

include_IceWine(ind) = ...

include_DessertWine(ind) = ...

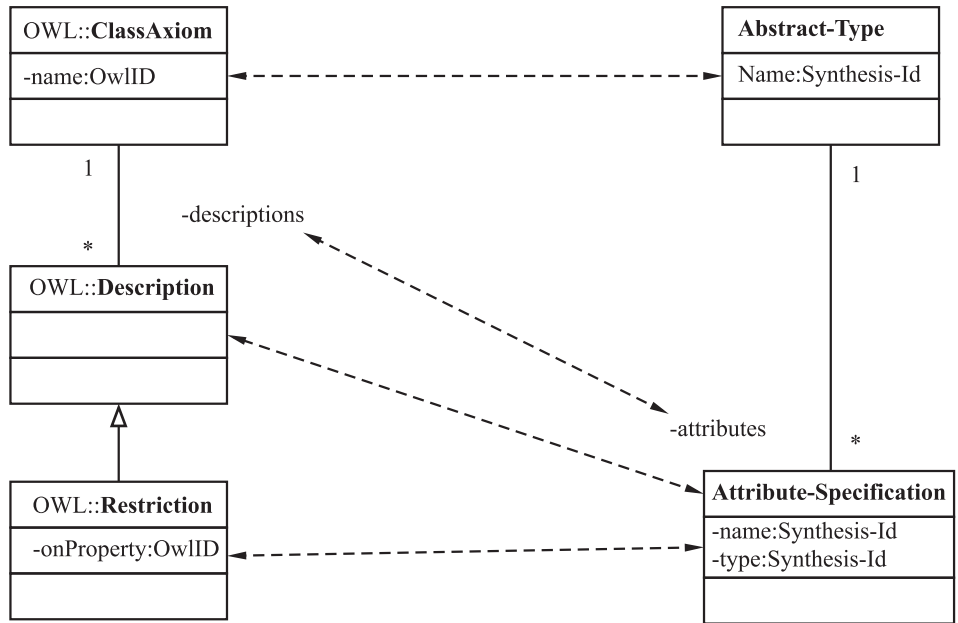


Рис. 2 Интеграция эталонных схем OWL и канонической модели

```

set_hasColor(ind, val) = ...
set_hasSugar(ind, val) = ...
set_hasFlavor(ind, val) =
PRE
  ind ∈ Wine ∧ val ∈ WineFlavor ∧
  ind ∈ IceWine ⇒ val ∈ {Strong, Moderate}
THEN
  hasFlavor(ind) := val
END
    
```

Множество всех индивидуализированных объектов (individuals) онтологии представляется в AMN множеством *Ind*, перечислимые классы (например, *WineColor*) представляются отдельными множествами. Классы (например, *Wine*) представляются одноименными переменными, типизированными в инварианте как подмножества *Ind*.

Объектные свойства (например, *hasColor*) представляются одноименными переменными, типизированными в инварианте как отношения между множествами, представляющими области определения и области значения свойств. Различные ограничения на классы и свойства (ограничения значений и кардинальности свойств, аксиомы эквивалентности классов и т.д.) представляются соответствующими частями инварианта. Каждому классу также ставится в соответствие операция, пополняющая класс новым элементом, а каждому свойству — операция, изменяющая значение этого свойства у некоторого индивидуализирован-

ного объекта. В примере рассмотрено тело лишь одной операции, соответствующей свойству *hasFlavor*. Операция изменяет значение свойства *hasFlavor* у индивидуализированного объекта *ind* на значение *val*, но только в том случае, когда выполняется предусловие операции, гарантирующее выполнение инварианта после выполнения операции.

4.3 Интеграция эталонных схем OWL и канонической модели

В данном разделе на небольших примерах будет продемонстрирована интеграция эталонных схем модели OWL и канонической модели (рис. 2), построенных на основе формального SDF-синтаксиса моделей.

На левой стороне рисунка в виде UML-диаграммы изображены типы, атрибуты и связи эталонной схемы модели OWL. Представлены связи двух видов: отношение обобщения — специализации (например, тип *Restriction* является подтипом *Description*) и ассоциации различных кардинальностей (например, с аксиомой класса *ClassAxiom* могут быть связаны описания — *Description*).

На правой стороне рисунка изображены типы эталонной схемы канонической модели.

В эталонных схемах типы, атрибуты и связи онтологически аннотируются экспертом на основании описаний моделей. Аннотации используются при установлении соответствий между конструк-

циями исходной и канонической моделей, происходящем автоматизированным образом с участием эксперта.

Полный список соответствий конструкций OWL и канонической модели (использующийся для построения транслятора OWL в каноническую модель) для рассмотренных на рис. 2 подмножеств моделей приведен в табл. 3. На рисунке соответствия обозначены пунктирными стрелками.

Таблица 3 Соответствия конструкций OWL и канонической модели

Конструкция OWL	Конструкция канонической модели
OwlID	Synthesis-Id
ClassAxiom	Abstract-Type
ClassAxiom.name	Abstract-Type.name
ClassAxiom.descriptions	Abstract-Type.attributes
Description	Attribute-Specification
Restriction	Attribute-Specification
Restriction.onProperty	Attribute-Specification.name

4.4 Создание расширения канонической модели

В процессе интеграции эталонных схем OWL и канонической модели было обнаружено, что атрибуту *kind* типа *ObjectPropertyAxiom*, определяющему вид объектного свойства (транзитивное, функциональное и т. д.), а также понятию *ObjectPropertyKind* не соответствуют никакие конструкции канонической модели.

В канонической модели понятию объектного свойства (*ObjectPropertyAxiom*) соответствует понятие метакласса ассоциаций (*Association-Metaclass*). Было принято решение о расширении канонической модели новыми метатипами ассоциаций — *Transitive*, *Functional* и т. д. В качестве примера рассмотрим спецификацию метатипа *Transitive*:

```
{ Transitive;
  in: association, metatype;
  instance_section: {
    domain: type;
    range: type;
    transitivity: {
      in: predicate, invariant;
      {{ all a/this.domain.inst,
          b/this.domain.inst,
          c/this.domain.inst(
            b/this.range.inst &
            in([a,b], this) &
            in([b,c], this) ->
            in([a,c], this)) }}
    } } }
```

Транзитивность ассоциаций выражается инвариантом *transitivity* и состоит в следующем: если *a* состоит в ассоциации с *b* и *b* состоит в ассоциации с *c*, то *a* состоит в ассоциации с *c* (*a*, *b*, *c* — значения некоторого типа данных). Так же выражается и вербальная семантика транзитивной ассоциации.

Семантику транзитивной ассоциации в AMN рассмотрим на следующем примере. Пусть тип *Region* содержит атрибут *subRegionOf*, принадлежащий метатипу ассоциаций *SubRegionOf* (который является подтипом метатипа транзитивных ассоциаций *Transitive*):

```
{ Region; in: type;
  subRegionOf: {set;
    type_of_element: Region;};
}
{ SubRegionOf; in: association, metatype;
  superclass: Transitive;
  instance_section: {
    domain: Region;
    range: Region;
  }
}}
```

Транзитивность ассоциации означает, что если регион *A* является подрегионом *B* и регион *B* является подрегионом *C*, то *A* является подрегионом *C*. При отображении в AMN данная семантика будет выражаться следующим инвариантом:

$$\forall a, b, c (a \in \text{ext_Region} \wedge b \in \text{ext_Region} \wedge c \in \text{ext_Region} \wedge a \in \text{subRegionOf}(b) \wedge b \in \text{subRegionOf}(c) \Rightarrow a \in \text{subRegionOf}(c))$$

Здесь *subRegionOf* — переменная, представляющая в AMN соответствующий атрибут, *ext_Region* — множество, представляющее все допустимые экземпляры типа *Region*.

Подобным же образом осуществляется расширение семантики канонической модели для других видов ассоциаций.

Список соответствий конструкций OWL и канонической модели расширяется следующим соответствием:

Конструкция OWL	Конструкция канонической модели
ObjectPropertyAxiom.kind	Association-Metaclass.superclass

Это соответствие означает, что вид объектного свойства OWL выражается в канонической модели отношением суперкласса между метатипом ассоциаций, выражающим объектное свойство (в примере — *SubRegionOf*), и некоторым встроенным метатипом ассоциаций (в примере — *Transitive*).

4.5 Построение отображения OWL в расширенную каноническую модель

Структура ASF-транслятора моделей в общем случае выглядит следующим образом:

```
module <имя модуля>
<список импортируемых модулей>
hiddens
  variables
    <список переменных>
exports
  context-free syntax
    <список сигнатур функций трансляции>
equations
<список правил трансляции>
```

Автоматически генерируются следующие элементы транслятора (тем самым образуя заготовку, подлежащую доработке экспертом):

- имя транслятора — `unifier/owl2synthesis/owl-translator`;
- список импортируемых (используемых) модулей:

```
imports unifier/owl/OWL-Syntax
imports unifier/synthesis/
  Synthesis-Syntax
```

- список переменных:

```
"ObjectPropertyAxiom"[0-9\']* ->
  ObjectPropertyAxiom
"Attribute-Specification"[0-9\']* ->
  Attribute-Specification
"Attribute-Specification*"[0-9\']* ->
  Attribute-Specification*
```

Данные определения означают, что в правилах трансляции могут использоваться переменные соответствующих сортов (например, переменная `Attribute-Specification2` сорта `Attribute-Specification`).

- список сигнатур функций трансляции:

```
t-Module-Def(Ontology) -> Module-Def
t-Type-Specification-List(Directive*)
-> {Type-Specification ","}*
t-Class-Declarator-List(Directive*)
-> {Class-Declarator ","}*
```

В данном примере функция `t-Module-Def` преобразует онтологию OWL в модуль канонической модели и порождена из соответствия элементов `Ontology` и `Module-Def`, функция `t-Type-Specification-List` преобразует список директив в список типов и порождена из соответствия связей `Ontology.directives` и `Module-Def.type`, функция `t-Class-Declarator-List` преобразует список

директив в список классов и порождена из соответствия связей `Ontology.directives` и `Module-Def.class_specification`.

- список заготовок правил трансляции:

```
[Module-Def]
Synthesis-Id := t-Module-Name(OwlID) ,
Type-Specification* :=
t-Type-Specification-List(Directive*) ,
Class-Declarator* :=
t-Class-Declarator-List(Directive*)
====>
t-Module-Def(Ontology(OwlID Directive*))
=
{ Synthesis-Id; in: module;
  type: Type-Specification*;
  class_specification:
    Class-Declarator*;
}
```

Приведенное правило описывает действие функции `t-Module-Def` и порождено на основе анализа элемента `t-Module-Def`, его атрибутов и ассоциаций (имя модуля соответствует имени онтологии OWL, секции типов и секции классов модуля соответствуют директивы). В правиле использованы рекурсивные вызовы функций преобразования списка директив в списки типов и классов.

Списки импортируемых модулей, переменных, сигнатур функций трансляции, правил трансляции дорабатываются (расширяются, изменяются) экспертом. По ASF-описанию транслятора при помощи средств среды `Meta-Environment` автоматически генерируется программный код транслятора на языке C. На этапе верификации уточнения моделей 5с код транслятора автоматически компилируется, и полученный C-транслятор используется для порождения канонических спецификаций образцов исходной модели. Вообще, одной из основных целей создания транслятора является его использование для конструирования И-систем: транслятор применяется для отображения схемы источника, описанной в исходной модели, в каноническую модель.

4.6 Верификация уточнения моделью OWL расширенной канонической модели

В данном подразделе рассматривается верификация отображения OWL в каноническую модель на примере схемы OWL, а именно — онтологии вин, рассмотренной в подразделе 4.2. Для данной онтологии уже рассмотрены спецификация на

OWL и семантика в AMN. Осталось рассмотреть отображение онтологии в каноническую модель, отображение канонической спецификации в AMN и верификацию уточнения AMN-спецификаций.

Каноническая спецификация, полученная применением транслятора OWL в каноническую модель (рассмотренного в предыдущем подразделе) к винной онтологии, выглядит следующим образом:

```
{ Wines; in: module, ontology;
type:
{ Wine; in: type, owl;
  hasColor: WineColor;
  metaslot
  in: HasColor;
  min_card: 1;
  max_card: 1
  end
  ...
},
{ DessertWine; in: type, owl;
  supertype: Wine;
  restriction_hasSugar: {
    in: predicate, invariant;
    {{ all w/DessertWine (
      in(w.hasSugar,
        {OffDry, Sweet})) }}
  };
},
{ IceWine; in: type, owl;
  restriction_hasFlavor: {
    in: predicate, invariant;
    {{ all w/IceWine (
      in(w.hasFlavor,
        {Strong, Moderate})) }}
  };
},
{ HasColor;
  in: association, metatype, owl;
  instance_section: {
    domain: Wine;
    range: WineColor;
  },
  ...
{ WineColor;
  { enum; enum_list: {White, Rose, Red} }
},
...
class_specification:
{ wine; in: class, owl;
  instance_section: Wine;
},
{ dessertWine; in: class, owl;
  superclass: wine;
  instance_section: Wine;
},
{ iceWine; in: class, owl;
  instance_section: {
    in: type, owl;
```

```
supertype: DessertWine;
equivalentClasses: {
  in: predicate, invariant;
  {{ iceWine = intersect(dessertWine,
    { w | in(w, wine) &
      w.hasFlavor = White })
  }}
};
};
}; }
```

Перечислимые классы OWL (например, *WineColor*) представляются в канонической модели одноименными перечислимыми типами. Классы (например, *Wine*) представляются одноименными типами (*Wine*) и классами (*wine*) канонической модели. Объектные свойства (например, *hasColor*) представляются атрибутами типов и метатипами ассоциаций (*HasColor*). Ограничения значений свойств представляются инвариантами типов (например, *DessertWine.restriction_hasSugar*). Ограничения, выражаемые отдельными аксиомами (например, аксиомы эквивалентности классов), представляются инвариантами классов канонической модели (например, *iceWine.equivalentClasses*).

Образом при отображении данной онтологии в AMN является конструкция *Wines*:

REFINEMENT *Wines*

SETS *AVAL*,

$WineColor = \{White, Rose, Red\}$,
 $WineFlavor = \{Delicate, Moderate, Strong\}$,
 $WineSugar = \{Sweet, OffDry, Dry\}$

CONSTANTS

$Obj, ext_Wine, ext_DessertWine, ext_IceWine$

PROPERTIES

$Obj \in POW(AVAL) \wedge$
 $ext_Wine \in POW(Obj) \wedge$
 $ext_DessertWine \in POW(Obj) \wedge$
 $ext_IceWine \in POW(Obj) \wedge$
 $ext_DessertWine \subseteq ext_Wine$
 $\wedge ext_IceWine \subseteq ext_DessertWine$

VARIABLES

$wine, iceWine, dessertWine,$
 $hasColor, hasFlavor, hasSugar$

INVARIANT

$wine \in POW(ext_Wine) \wedge$
 $iceWine \in POW(ext_IceWine) \wedge$
 $dessertWine \in POW(ext_DessertWine) \wedge$
 $dessertWine \subseteq wine \wedge$
 $hasColor \in ext_Wine \rightarrow WineColor \wedge$
 $hasFlavor \in ext_Wine \rightarrow WineFlavor \wedge$
 $hasSugar \in ext_Wine \rightarrow WineSugar \wedge$
 $\forall w(w \in ext_IceWine \Rightarrow$
 $hasFlavor(w) \in \{Strong, Moderate\}) \wedge$
 $\forall w(w \in ext_DessertWine \Rightarrow$

Таблица 4 Число теорем

Теоремы	Число теорем	Число автоматически доказанных теорем
Теорема непустоты объединенного состояния	1	0
Теоремы уточнения операции <i>include_Wine</i>	17	5
Теоремы уточнения операции <i>include_DessertWine</i>	20	5
Теоремы уточнения операции <i>include_IceWine</i>	21	5
Теоремы уточнения операции <i>set_hasColor</i>	11	1
Теоремы уточнения операции <i>set_hasSugar</i>	11	1
Теоремы уточнения операции <i>set_hasFlavor</i>	11	1
Общее число теорем	92	18

$hasSugar(w) \in \{OffDry, Sweet\} \wedge$
 $iceWine = dessertWine \cap$
 $\{w | w \in wine \wedge hasColor(w) = White\}$

OPERATIONS

$include_Wine(obj) = \dots$
 $include_IceWine(obj) = \dots$
 $include_DessertWine(obj) = \dots$
 $set_hasColor(obj, val) = \dots$
 $set_hasSugar(obj, val) = \dots$
 $set_hasFlavor(obj, val) =$

PRE

$obj \in wine \wedge val \in WineFlavor \wedge$
 $obj \in iceWine \Rightarrow val \in \{Strong, Moderate\}$

THEN

$hasFlavor(obj) := val$

END

Множество всех значений абстрактных типов данных представляется в AMN множеством *AVAL*, множество всех значений объектных типов данных — его подмножеством *Obj*. Перечислимые типы (например, *WineColor*) представляются отдельными множествами. Типы представляются множествами всех своих допустимых значений — экстенционалами (например, тип *Wine* представляется экстенсионалом *ext.Wine*). Экстенсионалы объектных типов типизируются в секции **PROPERTIES** как подмножества *Obj*. Отношение тип—подтип представляется отношением множество—подмножество на экстенционалах.

Классы (например, *wine*) представляются одноименными переменными, типизированными в инварианте как подмножества экстенсионалов типов своих экземпляров. Отношение класс—подкласс представляется отношением множество—подмножество на соответствующих переменных.

Атрибуты типов (например, *hasColor*) представляются одноименными переменными, типизированными в инварианте как функции, определенные на экстенсионале типа.

Различные ограничения на классы и свойства (ограничения значений и кардинальности свойств,

аксиомы эквивалентности классов и т. д.) представляются соответствующими частями инварианта.

Каждому классу также ставится в соответствие операция, пополняющая класс новым элементом, а каждому атрибуту — операция, изменяющая значение этого свойства у некоторого объекта. В примере рассмотрено тело лишь одной операции, соответствующей атрибуту *hasFlavor*. Операция изменяет значение свойства *hasFlavor* у объекта *obj* на значение *val*, но только в том случае, когда выполняется предусловие операции, гарантирующее выполнение инварианта после выполнения операции.

Спецификации AMN, отвечающие онтологии вин OWL и ее образу при отображении в каноническую модель, были введены в инструментальное средство автоматизации доказательства уточнения AMN (B-Toolkit 5.1.4). Далее автоматически были сформулированы 92 теоремы, в совокупности утверждающие факт уточнения спецификаций. Большое количество теорем объясняется тем, что сложные теоремы автоматически подразделяются инструментальным средством на более простые, которые можно доказывать независимо. Например, теорема уточнения операции *set_hasFlavor* была разделена на 11 теорем. С использованием автоматических средств доказательства было доказано 18 теорем, остальные были доказаны интерактивно. В табл. 4 указано общее число теорем и число автоматически доказанных теорем.

5 Состояние проблемы

Представляемая работа является новой, она не имеет аналогов в мировой практике. Наиболее близкие исследования активно ведутся в последние десять лет Microsoft Research и рядом университетов Европы и США с целью создания унифицированных средств манипулирования метаданными, главным образом в базах данных (спецификации интерфейсов лишь упоминаются). Эти средства сводятся к отображению схемы баз данных из одной модели

данных в *соответствующую* схему базы данных в другой модели данных [37]. Такие преобразования необходимы при решении ряда практических задач, включая обмен данными, интеграцию данных, формирование хранилищ данных, семантическую обработку запросов к базам данных.

Основным оператором отображения схем является *ModelGen* [38], параметрами которого служат исходная модель данных M_1 , целевая модель данных M_2 , исходная схема базы данных S_1 , выраженная в M_1 . Результатом *ModelGen* является целевая схема S_2 , выраженная в M_2 . Существенно, что *ModelGen* должен быть универсальным оператором, применимым к любым моделям данных в рассматриваемой среде.

Основная идея подхода *ModelGen* заключается в использовании метаподмодели — набора конструкций, используемых для определения моделей данных, являющихся экземплярами метаподмодели. Средствами определения конструкций этого набора являются унифицированные, не зависящие от моделей данных метаконструкции, классифицированные в [39] Халлом и Кингом в ряд категорий:

- лексем (наборов атомарных значений);
- абстрактов (сущностей, типов и т. д.);
- агрегатов (конструкций, основанных на подмножестве декартова произведения — таблиц, связей и пр.);
- функций (атрибутов, свойств);
- иерархий и пр.

Каждая модель определяется подмножеством таких конструкций и соответствующих им метаконструкций. Отображение схемы из одной модели данных в другую определяется в терминах трансформации метаконструкций. *Супермоделью* называется модель данных, содержащая конструкции, соответствующие всем метаконструкциям, известным системе. В системе [40] используется около дюжины таких конструкций. Каждая модель данных является *специализацией* супермодели, так что схема в любой модели данных является схемой в супермодели. Отображение схем выполняется как процесс элементарных шагов элиминации конструкций, отсутствующих в целевой модели, и, возможно, введения новых конструкций.

Процесс отображения включает следующие шаги:

1. Трансляцию исходной схемы в супермодель.
2. Трансляцию результата в целевую схему, выполняемую в рамках супермодели.
3. Трансляцию целевой схемы в целевую модель.

При этом шаги 1 и 3 объявляются трудоемкими и прямолинейными, поскольку каждая модель данных (исходная или целевая) *поглощается* (is subsumed) супермоделью. Единственная трансформация, согласно [38], кодированная авторами, соответствует шагу 2.

Инструментарий включает набор элементарных правил над метаконструкциями, выраженных на языке LDL (например, элиминация n -арных связей, элиминация атрибутов связей, элиминация связей «многие ко многим», замена связей ссылками, элиминация обобщений). Элиминация некоторой конструкции включает замену ее другой конструкцией. Композиция таких правил позволяет определять сложные трансформации. Унифицированные правила предполагают их специализацию в конкретной ситуации добавлением условий, определяющих, к каким концептам правила являются применимыми. Инструментарий позволяет верифицировать, принадлежат ли генерируемые схемы целевой модели, а также обнаруживать избыточность в последовательности элементарных преобразований.

В дальнейшем планируется введение макрооператоров [41–43] для шага 2:

- *Match* — возвращает отображение одной схемы в другую;
- *Merge* — для двух схем и отображения одной из них в другую возвращает интегрированную схему;
- *Diff* — для схемы и заданного для нее отображения возвращает остаток схемы, не входящий в отображение;
- *Compose* — возвращает композицию двух отображений схем.

Инструментарий поддерживает пользователей трех категорий:

- (1) проектировщиков схем в заданных моделях, использующих *ModelGen* для отображения полученных схем;
- (2) инженеров моделей, определяющих новые модели, применяя имеющиеся метаконструкции;
- (3) инженеров метаподмодели, добавляющих новые метаконструкции к метаподмодели и определяющих правила преобразования для них (тем самым расширяется набор моделей, поддерживаемых системой).

Подход *ModelGen* использует четырехуровневый реляционный словарь [44]:

- уровень метасупермодели, определяющий структуру метаконструкций;

- уровень супермодели, на котором хранятся схемы, подлежащие трансляции;
- уровень моделей данных, на котором определяются конструкции всех моделей данных среды, причем каждая конструкция связана с соответствующей ей метаконструкцией;
- уровень схем, на котором расположены все схемы системы.

Основные операции над словарем заключаются в определении новых моделей данных, основанных на имеющихся конструкциях, и схем для уже определенной модели. После определения модели данных инструментарий автоматически создает структуры, необходимые для работы со схемами.

Развитием инструментария *ModelGen* является инструментарий MIDST [40], который дополнительно к отображению схем позволяет реализовать трансформацию на уровне данных (если задана база данных D_1 в схеме S_1 , генерируется соответствующая база данных D_2 в схеме S_2).

Отдельно, без связи с инструментарием *ModelGen* или MIDST, рассматривается вопрос трансляции схем, который можно отнести к шагам 1 и 3 выше. Вопросы трансляции схем из исходной модели данных (например, объектной, реляционной, XML-ориентированной) в целевую рассматриваются в работах [45], где упоминается прототип интерактивной генерации реляционных схем из объектно-ориентированных, который встроен в Microsoft Visual Studio 2005. В процессе трансляции схем используются правила элиминации конструкций исходной схемы, которые отсутствуют в целевой модели данных.

Неопределенными остаются термины *соответствия, специализации, поглощения* во фразах типа:

- отображение схемы базы данных из одной модели данных в *соответствующую* схему базы данных в другой модели данных;
- каждая модель данных является *специализацией* супермодели, так что схема в любой модели данных является схемой в супермодели;
- генерируется *соответствующая* база данных D_2 в схеме S_2 ;
- каждая модель данных (исходная или целевая) *поглощается* супермоделью.

Заметна недостаточность теоретических обоснований и необходимого минимума формальных определений.

Одной из попыток формального обоснования рассматриваемых отображений схем можно считать работу [46]. В ней используется категорный подход, даны определения, на основе которых можно было

бы попытаться определить точный смысл свойств отображений схем и моделей (таких как соответствие, специализация, поглощение). Однако совершенно не ясно, каким образом можно было бы доказывать выполнимость этих свойств. Более того, авторы признают ограниченность предлагаемых формализмов: «Мы не рассматриваем проблемы отображения одной модели данных (например, реляционной) в другую модель (например, объектно-ориентированную). Представленный формализм применим к должным образом упрощенной XML Schema».

Авторы отмечают, что хотя алгебраическая и теоретико-модельная семантика средств отображения схем и рассматривалась в [46, 47], она остается во многом не исследованной областью.

Интересны в этой связи рассуждения в работе [37]. Необходимо обеспечить, чтобы для каждого экземпляра исходной схемы существовал экземпляр целевой схемы, из которого можно было бы реконструировать экземпляр исходной схемы. Доминирование [47] соответствует отображению экземпляров исходной схемы в целевую, которое должно быть тотальной инъектирующей функцией.

Другими словами, образуется биекция между множеством исходных экземпляров и подмножеством целевых экземпляров данных. Это считается общим требованием правильности отображения исходной модели в целевую (что, конечно же, не точно, например в случае отображения моделей и схем для интеграции баз данных, поскольку дезориентирует пользователя целевой модели — он может ожидать появления экземпляров, которые никогда не появятся из-за семантики исходной модели). Утверждается, что универсальная характеристика отображения моделей данных (или схем баз данных) является сложным делом: например, при трансляции схем исходная и целевая модели могут обладать различными выразительными способностями, так что при интуитивной трансляции не удастся образовать ни доминирующей, ни эквивалентной схемы, что может привести к потере информации, представленной в рамках исходной схемы. Как выход из существующего положения предлагается применять реверсивные отображения, которые могут стать критерием правильности [41].

В работе [48] предлагается использовать расширяемую модель, а специализация и *refinement* могут применяться для расширения модели, в которой метаконструкции организованы в виде иерархии наследования (решетки) предопределенных понятий. Этот подход рассматривается как альтернатива подходу, основанному на метаконструкциях супермодели.

В работах Бернстайна макрооператоры над схемами баз данных (*Match, Merge, Diff, Compose*) рассматриваются чисто синтаксически: схемы и их отображения трактуются как графовые структуры, семантика схем, определяемая соответствующими языками определения данных [41], при этом отбрасывается. Авторы осознают этот недостаток и в будущем предполагают провести дополнительные исследования.

В практическом плане достижением считается разработанная в результате многолетних исследований Алмаден Центра фирмы ИБМ система CLIO [49], которая позволяет осуществлять отображение схем ресурсных баз данных в целевые схемы, выраженные в ограниченном подмножестве структурированных информационных моделей.

Кратко сравнение рассматриваемого в настоящей работе подхода (Синтез) и подхода *ModelGen*, развивавшихся независимо, заключается в следующем.

Выразительные способности супер- и канонической моделей. Цели отображения моделей данных и схем различны: в Синтезе оно применяется, прежде всего, для синтеза канонической информационной модели и интеграции информационных ресурсов. Поэтому в Синтезе рассматриваются разнообразные виды информационных ресурсов, не только базы данных.

Супермодель *ModelGen* можно сравнивать с канонической моделью лишь условно. Каноническая модель Синтеза является рабочим языком спецификации посредников как приложений. Супермодель не является законченным языком и служит в качестве вспомогательного средства отображения схем.

Набор метаконструкций ядра канонической модели (языка Синтез [32]) не ограничивается структурированными моделями данных, подобно *ModelGen*. Он значительно шире и включает абстрактные типы данных (АТД) — объектные и неobjектные, фреймы, которые совместно с типизированными значениями приводят к образованию гибридной строго типизированной и слабоструктурированной модели, функции как составляющие абстрактных типов (методы) и автономные функции (специфицируемые своими сигнатурами, пред- и постусловиями), классы как множества объектов определенного типа, отношения подтипа, подкласса, связи между экземплярами АТД, метаклассы, инварианты АТД и классов, выражаемые средствами языка логических формул Синтеза, процессы. Конструкции супермодели легко включаются в состав конструкций канонической модели.

Отличие способов расширения моделей. Расширение канонической модели и расширение супермодели качественно различаются. Расширение канонической модели — это семантический процесс введения в модель новых образцов параметризованных замкнутых логических формул, выражающих в целевой модели зависимости данных, характерные для исходной модели, параметризованных родовых типов данных, представляющих новые типы данных, отсутствующие в ядре канонической модели, метафреймов, аннотирующих дополнительные свойства конструкций ядра в расширенной модели. В *ModelGen* процесс расширения супермодели — это, в основном, механический процесс введения в нее новых метаконструкций.

Сохранение информации при отображении моделей. Модели информационных ресурсов в Синтезе считаются определяемыми соответствующими им языками со всеми деталями этих языков — их синтаксисом и семантикой (для баз данных это два языка — язык определения данных и язык манипулирования данными). *ModelGen* абстрагируется от этого, извлекая из языка определения данных только спецификации структур данных. Исключается детальное рассмотрение семантики языков, ограничений целостности баз данных, функций. Это неизбежно приводит к потере информации при отображении моделей данных (например, при отображении объектных моделей в реляционные).

Метод Синтеза основан на формальном определении семантики схем в исходной и целевой модели для доказательства факта уточнения результата отображения схемы в целевую модель схемой исходной модели. Отношение уточнения является строго определенным, и его использование в методе для доказательства коммутативности диаграмм отображения спецификаций исходной модели данных в целевую позволяет сохранить информацию и операции и исключить использование плохо определенных понятий (соответствия, специализации, поглощения схем).

Различие архитектур. Инфраструктура Унификатора моделей разработана с учетом указанных отличий Синтеза и *ModelGen*. Процесс отображения из исходной модели данных в ядро канонической модели включает определение необходимого расширения ядра на основе сопоставления конструкций исходной и целевой моделей, доказательство правильности отображения и построение транслятора из исходной модели в целевую средствами метакомпиляции. Таким образом, получается готовый продукт преобразования схем. Сопоставление

конструкций исходной и целевой моделей и расширение ядра являются интерактивным творческим процессом, в котором помощь эксперту оказывают онтологические спецификации, аннотирующие конструкции исходной и целевой моделей, позволяющие устанавливать отношения близости конструкций.

Метод Синтеза позволяет отображать произвольные модели данных, в частности, для поддержки обмена данными. Это можно выполнять непосредственно из модели в модель или через посредство канонической модели. Целесообразность осуществления отображения моделей в рамках канонической модели отображением в нее исходной и целевой моделей (подобно отображению моделей и схем в супермодель) требует специального анализа.

Помимо универсальных средств отображения моделей данных и схем баз данных широко известны попытки разработать общие языки информационных моделей, спецификаций. Достаточно упомянуть UML, различные архитектуры разработки открытых систем (например, The Open Applications Group Integration Specification (OAGIS), модели архитектур программного обеспечения, определяющие компоненты программ, их свойства и связи между ними (Acme, Aesop, SADL)), выявление и описание типовых конструкций разнородных процессных моделей (проект, выполненный недавно в Голландии группой Ван дер Аальста), архитектуры открытых систем OMG, движимые моделями (MDA). Недостатком указанных попыток является стремление создать общий язык как единое целое, безотносительно к другим языкам спецификаций ресурсов.

Для известных работ характерны отсутствие (недостаточность) точных спецификаций семантики языков, отсутствие верификации отображений информационных моделей (например, в MDA), отсутствие понятия синтеза *расширяемой* унифицирующей (канонической) модели. Разработанные авторами методы отличаются от известных тем, что во главу угла ставят расширяемую каноническую модель, конструируемую модульно путем расширения ее ядра, имеют точно определенные формальные основания, широко применяют принцип уточнения при унифицирующих преобразованиях моделей.

6 Заключение

Рост объема накапливаемой информации (информационных ресурсов) в различных областях деятельности человека сопровождается взрывоподоб-

ным процессом создания разнообразных информационных моделей (языков) представления информации и манипулирования ею. Чем больше разнообразие применяемых моделей в различных ресурсах, тем более сложными становятся процессы их интеграции и композиции при создании информационных систем. Сложность семантики информационных моделей делает такие процессы интеграции неосуществимыми при попытке манипулирования разномодельными спецификациями ресурсов. Единственным практическим выходом является приведение разномодельных спецификаций к общей, унифицированной модели, называемой канонической.

На протяжении длительного периода времени в лаборатории композиционных методов проектирования информационных систем ИПИ РАН разрабатывались методы синтеза канонических моделей для широкого спектра реальных информационных моделей: структурированных, объектных, сервисных, процессных, включая произвольные их комбинации. При этом рассматривались полные спецификации моделей (языков), включая средства описания как информационных структур (типов данных), так и поведения (операций, функций и процессов). При отображении структурированных, слабоструктурированных, объектных, процессных моделей в каноническую модель разработанные методы сохраняют информацию и операции в соответствии с принципом уточнения. В работе показано, как строить такие семантические отображения формально с целью верификации правильности достижения уточнения расширенной канонической модели исходной информационной моделью. В результате достигнута полнота охвата канонической моделью семантики разнообразных требующихся на практике видов моделей представления информации с возможностью доказательства правильности представления в расширяемой канонической модели неоднородных практически используемых моделей.

Разнообразные методы, на которые опирается данная работа, разрабатывались авторами на протяжении нескольких десятилетий. Эти методы более подробно рассмотрены в других работах авторов.

Вместе с тем в реальных системах ввиду большого разнообразия используемых информационных моделей применение разработанных методов вручную становится неэффективным. В работе предложена архитектура и функции компонентов Унификатора моделей, позволяющего доказательно приводить множество разнотипных информационных моделей ресурсов к каноническому представлению, опираясь на разработанные ранее методы. На

примере отображения фрагментов онтологического языка OWL, применяемого в Веб, продемонстрирован процесс доказательного отображения этой информационной модели в каноническую, ядро которой составляет гибридный объектно-фреймовый язык Синтез. Унификатор моделей находится в состоянии реализации.

Литература

1. *Denning P.* Computing is a Natural Science // Communications of the ACM, 2007. Vol. 50, № 7.
2. *Denning P.* Great principles of computing // Communications of the ACM, 2003. Vol. 46, № 11.
3. *Kroger P.* Molecular biology data: Database overview, modelling issues, and perspectives. — Munich: Institute for Informatics, Munich University, 2001.
4. *Bry F., Kroger P.* A computational biology database digest: Data, data analysis, and data management // J. of Distributed and Parallel Databases, 2003. Vol. 13, № 1. P. 7–42.
5. Data model for observation, Version 0.23. // IVOA DM WG Internal Draft, 2004.
6. *Cambresy L., Derriere S., Padovani P., Martinez A.P., and Richard A.* Ontology of astronomical object types, Version 1.0. // IVOA Technical Note <http://www.ivoa.net/Documents/cover/AstrObjectOntology-20061031.html>, 2006.
7. *Kalinichenko L.A., Briukhov D.O., Martynov D.O., Skvortsov N.A., Stupnikov S.A.* Mediation framework for enterprise information system infrastructures // 9th Conference (International) on Enterprise Information Systems (ICEIS), 2007.
8. *Калиниченко Л.А.* Методология организации решения задач над множественными распределенными неоднородными источниками информации // Международная конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование». — М.: МГУ, 2005. С. 20–37.
9. *Kalinichenko L.A.* Data model transformation method based on axiomatic data model extension // 4th Conference (International) on Very Large Data Bases, 1978.
10. *Калиниченко Л.А.* Методы и средства интеграции неоднородных баз данных. — М.: Наука, 1983.
11. *Kalinichenko L.A.* Methods and tools for equivalent data model mapping construction // Proc. EDBT'90 Conference. Springer-Verlag, 1990. P. 92–119.
12. *Kalinichenko L.A., Skvortsov N.A.* Extensible ontological modeling framework for subject mediation // 4th Russian Scientific Conference “DIGITAL LIBRARIES: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections.” — Dubna, 2002.
13. *Kalinichenko L.A.* Canonical model development techniques aimed at semantic interoperability in the heterogeneous world of information modeling // Knowledge and model driven information systems engineering for networked organizations: Proc. of the CAiSE INTEROP Workshop. — Riga: Riga Technical University, 2004. P. 101–116.
14. *Kalinichenko L.A., Stupnikov S.A., Zemtsov N.A.* Extensible canonical process model synthesis applying formal interpretation // East-European Conference ADBIS'05. Springer, 2005.
15. *Калиниченко Л.А., Ступников С.А., Земцов Н.А.* Синтез канонических моделей для интеграции неоднородных источников информации. — М.: ИПИ РАН, 2005. 87 с.
16. *Калиниченко Л.А.* Синтез канонических моделей, предназначенных для достижения семантической интероперабельности неоднородных источников информации // Системы и средства информатики: Спец. вып. «Формальные методы и модели в композиционных инфраструктурах распределенных информационных систем». — М.: ИПИ РАН, 2005.
17. *Ступников С.А.* Формальная семантика ядра канонической объектной информационной модели // Системы и средства информатики: Спец. вып. «Формальные методы и модели в композиционных инфраструктурах распределенных информационных систем». — М.: ИПИ РАН, 2005.
18. *Ступников С.А.* Отображение спецификаций, выраженных средствами ядра канонической модели, в Нотацию Абстрактных Машин // Системы и средства информатики: Спец. вып. «Формальные методы и модели в композиционных инфраструктурах распределенных информационных систем». — М.: ИПИ РАН, 2005.
19. *Ступников С.А.* Автоматизация верификации уточнения при композиционном пректировании информационных систем и посредников // Системы и средства информатики: Спец. вып. «Формальные методы и модели в композиционных инфраструктурах распределенных информационных систем». — М.: ИПИ РАН, 2005.
20. *Ступников С.А., Брюхов Д.О.* Представление UML и OCL в канонической информационной модели // Системы и средства информатики: Спец. вып. «Формальные методы и модели в композиционных инфраструктурах распределенных информационных систем». — М.: ИПИ РАН, 2005.
21. *Kalinichenko L.A.* Method for data models integration in the common paradigm // Advances in Databases and Information Systems: Proc. of the 1st East-European Conference. — St. Petersburg: Nevsky Dialekt, 1997. P. 275–284.
22. *Butler M.* csp2B: A practical approach to combining CSP and B // Formal Aspects of Computing, 2000. Vol. 12.
23. *Treharne H., Schneider S.* How to Drive a B machine // Formal Specification and Development in Z and B: First International Conference of Z and B Users, 2000.
24. *Stupnikov S.A., Kalinichenko L.A., Dong J.S.* Applying CSP-like workflow process specifications for their refinement in AMN by pre-existing workflows // Advances in

- Databases and Information Systems: Proc. of the 6th East-European Conference. — Bratislava: Slovak University of Technology, 2002. P. 206–215.
25. *Abrial J.-R.* B#: Toward a synthesis between Z and B // ZB'2003 — Formal Specification and Development in Z and B: International Conference of B and Z Users, 2003. P. 168–177.
 26. *Stupnikov S. A., Kalinichenko L. A., Bressan S.* Interactive discovery and composition of complex Web services // East-European Conference on ADBIS'06. Springer, 2006.
 27. *Abrial J.-R.* B-Technology. Technical overview. B-Core (UK) Ltd., 1993.
 28. *Abrial J.-R.* The B-Book: Assigning programs to meanings. — Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
 29. *Cansell D., Mery D.* Foundations of the B Method // Computing and Informatics, 2003. Vol. 22, No. 3–4. P. 221–256.
 30. The B-Toolkit. <http://www.b-core.com/ONLINEDOC/BToolkit.html>.
 31. Atelier B: The industrial tool to efficiently deploy the B method. <http://www.atelierb.societe.com/index-uk.html>.
 32. *Kalinichenko L. A., Stupnikov S. A., Martynov D. O.* SYNTHESIS: A language for canonical information modeling and mediator definition for problem solving in heterogeneous information resource environments. — M.: IPI RAS, 2007. 171 p.
 33. *Van den Brand M. G. J., van Deursen A., Heering J., et al.* The ASF + SDF meta-environment: A component-based language development environment // Compiler Construction 2001 / Ed. by R. Wilhelm. Springer, 2001. P. 365–370.
 34. *Van der Aalst W. M. P., ter Hofstede A. H. M., Kiepuszewski B., Barros A. P.* Workflow patterns // Distributed and Parallel Databases, 2003. Vol. 14. № 3. P. 5–51.
 35. OWL Web ontology language reference. W3C Recommendation. <http://www.w3.org/TR/owl-ref/>, 2004.
 36. *Patel-Schneider P. F., Hayes P., Horrocks I.* OWL Web ontology language semantics and abstract syntax // W3C Recommendation. <http://www.w3.org/TR/owl-semantics/>, 2004.
 37. *Atzeni P.* Schema and data translation: A personal perspective // 11th East European Conference ADBIS 2007. Springer, 2007.
 38. *Atzeni P., Cappellari P., Bernstein P.* ModelGen: Model independent schema translation // 21st International Conference on Data Engineering, 2005.
 39. *Hull R., King R.* Semantic database modeling: Survey, applications and research issues // ACM Computing Surveys, 1987. Vol. 19. № 3.
 40. *Atzeni P., Cappellari P., Gianforme G.* MIDST: Model independent schema and data translation // SIGMOD 2007 Conference.
 41. *Bernstein P.* Applying model management to classical meta data problems // 2003 CIDR Conference.
 42. *Melnik S., Rahm E., Bernstein P.* Rondo: A programming platform for generic model management // SIGMOD 2003 Conference.
 43. *Melnik S., Bernstein P., Halevy A., Rahm E.* Supporting executable mappings in model management // SIGMOD 2005 Conference.
 44. *Atzeni P., Cappellari P., Bernstein P.* A multilevel dictionary for model management // ER 2005 Conference. Springer-Verlag, 2005.
 45. *Bernstein P., Melnik S., Mork P.* Interactive schema translation with instance-level mappings // 31st VLDB Conference, 2005.
 46. *Alagic S., Bernstein P.* A model theory for generic schema management // DBPL, 2001.
 47. *Miller R., Ioannidis Y., Ramakrishnan R.* Schema equivalence in heterogeneous systems: Bridging theory and practice // Information Systems, 1994. Vol. 19. № 1.
 48. *Barsalou T., Gangopadhyay D.* M(dm): An open framework for interoperation of multimodel multidatabase systems // ICDE 1992. — Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1992.
 49. *Haas L. M., Hernandez M. A., Ho H., Popa L., and Roth M.* Clio, 2005. Grows up: From research prototype to industrial tool // Proc. of the ACM SIGMOD Conference, 2005. Baltimore, Maryland, USA.

СТАЦИОНАРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОДНОВРЕМЕННЫМИ ОТКАЗАМИ ПРИБОРОВ*

А. В. Печинкин¹, И. А. Соколов², В. В. Чаплыгин³

Аннотация: Рассматривается многолинейная система массового обслуживания с полумарковским потоком заявок, обслуживанием фазового типа и ненадежными приборами, отказывающимися и восстанавливающимися одновременно. Получены математические соотношения для расчета основных стационарных показателей функционирования системы при некоторых вариантах процесса отказов–восстановлений приборов.

Ключевые слова: система массового обслуживания; ненадежные приборы

1 Описание системы

Статья посвящена анализу многолинейных систем массового обслуживания (СМО) с ненадежными приборами и является логическим продолжением [1, 2], в которых для некоторых типов многолинейных СМО с независимыми отказами ненадежных приборов найдены выражения для расчета показателей функционирования. Опираясь на результаты, полученные в [3] для системы $SM/MSP/n/r$, далее будут выведены математические соотношения, позволяющие вычислять основные стационарные характеристики многолинейных систем с полумарковским входящим потоком заявок, обслуживанием фазового типа и различными вариантами процесса одновременных отказов–восстановлений ненадежных приборов.

Рассмотрим многолинейную СМО $SM/PH/n/r$ с полумарковским входящим потоком заявок, распределением фазового типа времени обслуживания каждой заявки, накопителем конечной или бесконечной емкости и ненадежными приборами.

Полумарковский входящий поток заявок определяется полумарковским процессом с конечным множеством состояний $\{1, 2, \dots, I\}$, $1 \leq I < \infty$, поведение которого описывается матрицей $A(x) = (A_{ij}(x))_{i,j=\overline{1,I}}$, где $A_{ij}(x)$ — вероятность того, что полумарковский процесс за время меньше x перейдет из состояния i сразу в состояние j , $i, j = \overline{1, I}$.

Введем обозначения:

$A = A(\infty)$ — матрица переходных вероятностей вложенной цепи Маркова полумарковского процесса;

$\vec{\pi}_a$ — вектор-строка стационарных вероятностей вложенной цепи Маркова;

$\vec{1}$ — вектор-столбец из единиц,

$\vec{0}$ — нулевой вектор-столбец,

0 — нулевая матрица (наряду с обычным числом 0),

E — единичная матрица, размерность и порядок которых определяются либо из контекста, либо нижним индексом, например $\vec{1}_k, 0_{m,l}$;

$\bar{a} = \vec{\pi}_a \int_0^{\infty} x dA(x) \vec{1} < \infty$ — среднее время между поступлениями заявок в стационарном режиме функционирования системы.

Более подробное описание полумарковского входящего потока, а также некоторые естественные дополнительные предположения относительно параметров, которые будут предполагаться выполненными, приведены в [1, 2].

Каждый из n имеющихся в системе приборов может находиться либо в исправном, либо в неисправном состоянии. Состояние прибора будем считать исправным, если на приборе находится заявка и прибор занят ее обслуживанием или если прибор свободен, готов принять заявку и немедленно начать ее обслуживание. Состояние прибора будем считать неисправным, если на приборе находится заявка, но прибор ее не обслуживает, или если прибор свободен, но не может немедленно начать обслуживание заявки, если таковая на него поступит. Если при отказе прибора (переходе прибора из исправного состояния в неисправное) на

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 05-07-90103, 06-07-89056).

¹ Институт проблем информатики Российской академии наук, apchinkin@ipiran.ru

² Институт проблем информатики Российской академии наук, isokolov@ipiran.ru

³ Институт проблем информатики Российской академии наук, vchaplugin@ipiran.ru

нем находится заявка, то она остается на приборе до момента восстановления (перехода прибора из неисправного состояния в исправное) и затем, в зависимости от варианта функционирования системы, либо дообслуживается, либо обслуживается заново.

Будем называть прибор занятым, если на нем находится заявка, и свободным в противном случае. Если в некоторый момент времени на обслуживание поступает очередная заявка, но все приборы заняты, то эта заявка попадает в накопитель, становясь в очередь на обслуживание. Заявки из очереди на обслуживание выбираются в порядке их поступления в накопитель.

В случае накопителя конечной емкости r заявка, поступающая в систему, в которой уже имеется $n + r$ заявок (n на приборах и r в очереди) теряется.

Распределение фазового типа (РН-распределение) времени обслуживания заявки с числом фаз обслуживания J , $1 \leq J < \infty$, описывается матрицей $H = (h_{ij})_{i,j=\overline{1,J}}$ и вектор-строкой $\vec{h} = (h_i)_{i=\overline{1,J}}$ (см. также [1, 2]). Здесь h_{ij} , $i, j = \overline{1, J}$, $j \neq i$, — интенсивность изменения фазы обслуживания с i -й на j -ю (без окончания обслуживания заявки); h_i , $i = \overline{1, J}$, — вероятность того, что обслуживание заявки начинается с фазы i .

Положим также $\vec{h}^* = -H\vec{1}$. Координата h_i^* вектора \vec{h}^* представляет собой интенсивность окончания обслуживания заявки при фазе обслуживания i . Напомним, что функцию распределения фазового типа времени обслуживания заявки можно записать в виде

$$H(x) = 1 - \vec{h} e^{Hx} \vec{1}.$$

Цель настоящей работы заключается в нахождении программно реализуемых математических соотношений для расчета основных стационарных характеристик описанной выше СМО $SM/PH/n/r$ ($r \leq \infty$) с ненадежными приборами. При этом, в отличие от [1, 2], будем считать, что отказы приборов происходят одновременно.

Будут рассмотрены следующие варианты функционирования системы $SM/PH/n/r$ с ненадежными приборами:

- в разделе 3 заявки обслуживаются заново, свободные и занятые приборы одновременно отказывают и восстанавливаются;
- в разделе 4 заявки дообслуживаются, свободные и занятые приборы одновременно отказывают и восстанавливаются;
- в разделе 5 заявки обслуживаются заново, занятые приборы одновременно отказывают и восстанавливаются, свободные приборы находятся только в исправном состоянии;

- в разделе 6 заявки обслуживаются заново, отказывают и восстанавливаются с разной интенсивностью одновременно свободные и одновременно занятые приборы;
- в разделе 7 заявки дообслуживаются, занятые приборы одновременно отказывают и восстанавливаются, свободные приборы находятся только в исправном состоянии;
- в разделе 8 заявки дообслуживаются, отказывают и восстанавливаются с разной интенсивностью одновременно свободные и одновременно занятые приборы.

Во всех вариантах заявки могут поступать на все приборы: сначала они ищут свободный исправный прибор, затем, если такого нет, но есть свободный неисправный прибор, становятся на него, и, наконец, если все приборы заняты, становятся в очередь (или даже теряются в случае переполнения системы с конечным накопителем).

2 Базовая модель

Дальнейшие исследования в части вычисления стационарных распределений вероятностей состояний будут опираться на базовую модель СМО. Базовая модель, а также формулы для вычисления ее основных стационарных характеристик приведены для случая бесконечного накопителя в [1], а для случая конечного накопителя — в [2].

Ограничимся кратким описанием базовой модели.

Модель представляет собой многолинейную СМО с накопителем бесконечной емкости, надежными приборами, полумарковским входящим потоком (процессом генерации) заявок, описанным в предыдущем пункте, и марковским процессом обслуживания заявок, определяемым следующим образом.

Поскольку основная сложность дальнейшего анализа СМО с ненадежными приборами будет состоять в том, чтобы построить для этой СМО марковский процесс обслуживания, приводящий к эквивалентной (с точки зрения вероятностей состояний) базовой модели, приведем подробное описание такого процесса.

Если в системе находится k , $k \geq 0$, заявок (далее будем говорить также, что процесс обслуживания находится на слое k), то процесс обслуживания может находиться в одном из l_k , $l_k < \infty$, состояний (фаз обслуживания). Далее, если в некоторый момент в системе находится k , $k \geq 1$, заявок и фаза обслуживания равна i , $i = \overline{1, l_k}$, то за «малое» время Δ с вероятностью $\lambda_{ij}^{(k)} \Delta + o(\Delta)$ фаза изменится

на j , $j = \overline{1, l_k}$, $j \neq i$, и все заявки будут продолжать обслуживаться, а с вероятностью $n_{ij}^{(k)} \Delta + o(\Delta)$ фаза изменится на j , $j = \overline{1, l_{k-1}}$, но обслуживание одной из заявок закончится и она покинет систему. Матрицы из элементов $\lambda_{ij}^{(k)}$ и $n_{ij}^{(k)}$ будем обозначать через Λ_k и N_k , $k \geq 1$. Если же в системе отсутствуют заявки, то за «малое» время Δ с вероятностью $\lambda_{ij}^{(0)} \Delta + o(\Delta)$ фаза изменится с i на j , $i, j = \overline{1, l_0}$, $j \neq i$, естественно, без окончания обслуживания заявки. Матрицу из элементов $\lambda_{ij}^{(0)}$ будем обозначать через Λ_0 .

Кроме того, будем предполагать, что $l_k = l$ при $k \geq n$, матрицы $\Lambda_k = \Lambda$ совпадают при $k \geq n$, а матрицы $N_k = N$ совпадают при $k \geq n + 1$.

Введем также матрицу $\Lambda^* = \Lambda + N$, причем матрица Λ^* предполагается неразложимой, а матрица N — ненулевой. Более того, будем предполагать, что при исходных параметрах рассматриваемой СМО введенная далее вложенная цепь Маркова будет неприводимой.

Наконец, при $k = \overline{0, n-1}$ будем предполагать, что если в момент поступления очередной заявки в системе имеется k других заявок и фаза обслуживания равна i , $i = \overline{1, l_k}$, то после поступления новой заявки фаза обслуживания с вероятностью $\omega_{ij}^{(k)}$ изменится на j , $j = \overline{1, l_{k+1}}$. Соответственно, матрицу из элементов $\omega_{ij}^{(k)}$ будем обозначать через Ω_k .

Введем стационарную интенсивность обслуживания μ при бесконечной очереди следующим образом:

$$\mu = \vec{\pi}_s N \vec{1},$$

где через $\vec{\pi}_s$ обозначена вектор-строка стационарных вероятностей марковского процесса с инфинитезимальной матрицей Λ^* . В случае бесконечного накопителя будем предполагать, что $\rho < 1$, а число ρ , определяемое выражением $\rho = (\vec{a}\mu)^{-1}$, назовем нагрузкой на систему.

В [1, 2] для базовой модели СМО через исходные параметры находятся (для случаев бесконечного и конечного накопителей) инфинитезимальная матрица и матрица из вероятностей переходов за время t марковского процесса обслуживания заявок. Затем вычисляется матрица переходных вероятностей вложенной цепи Маркова, порожденной моментами поступления заявок в систему. Наконец, определяются вектор-строки, координатами которых являются стационарные вероятности по вложенной цепи Маркова и по времени того, что в системе находятся k заявок, а фазы процессов генерации и обслуживания заявок равны i и j . Кроме того, там же вычисляются стационарное распределение $W(x)$ времени ожидания начала обслуживания заявки (в случае конечного накопителя предполагается, что

заявка, не принятая в систему из-за переполнения, имеет нулевое время ожидания начала обслуживания) и стационарная вероятность π потери заявки.

В настоящей работе, так же, как и в [1, 2], вместо линейной нумерации состояний процесса обслуживания будем использовать мультииндексную нумерацию, при которой номер состояния определяется мультииндексом (i_1, \dots, i_r) или объединением таких мультииндексов, где каждому числу k заявок в системе соответствует одно или несколько значений r , а $i_1, \dots, i_r = \overline{1, J}$ (напомним, что J — число фаз РН-распределения времени обслуживания заявки), причем в случае $k \geq n$ подмножества мультииндексов совпадают. Перейти от мультииндексной нумерации состояний процесса обслуживания к линейной в системе можно различными способами. В частности, рациональный способ такого перехода (на примере СМО $SM/PH/n/\infty$ с надежными приборами) предложен в [3].

3 Одновременные отказы всех приборов и обслуживание заявок заново

Наиболее просто к базовой СМО приводится система $SM/PH/n/r$ с ненадежными приборами, функционирование процесса отказов—восстановлений которой описывается следующим образом:

- все (занятые и свободные) приборы отказывают одновременно с интенсивностью α и также одновременно восстанавливаются с интенсивностью β ;
- поступающая в систему заявка, заставшая все приборы в неисправном состоянии, становится на свободный неисправный прибор, если таковой имеется, в противном случае попадает в накопитель (или вообще теряется, если в системе конечный накопитель и все приборы и места ожидания заняты);
- заявка, обслуживание которой было прервано из-за отказа прибора, после восстановления прибора обслуживается заново.

Определим множество состояний на слое k :

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_0 &= \{(1), (0)\}; \\ \mathcal{X}_k &= \{(i_1, \dots, i_k), (0)\}, \quad k = \overline{1, n-1}; \\ \mathcal{X}_k &= \{(i_1, \dots, i_n), (0)\}, \quad k \geq n. \end{aligned}$$

Здесь состояние (1) означает (для слоя 0 — заявки в системе отсутствуют), что все приборы исправны, состояние (0) (для всех слоев) — все приборы исправны, значение l -й координаты i_l , $l = \overline{1, k}$ или

$l = \overline{1, n}$, мультииндекса (i_1, \dots, i_k) или (i_1, \dots, i_n) показывает фазу обслуживания заявки на l -м приборе (далее будем считать, что нумерация приборов определяется моментами поступления находящихся на них заявок).

Теперь для того чтобы найти стационарные вероятности состояний, достаточно воспользоваться базовой моделью, в которой для марковского процесса обслуживания нужно положить

$$\begin{aligned} \Omega_k &= \begin{pmatrix} E_{J^k} \otimes \vec{h} & \vec{0}_{J^k} \\ \vec{0}_{J^{k+1}}^T & 1 \end{pmatrix}, \quad k = \overline{0, n-1}; \\ N_k &= \begin{pmatrix} \vec{N}_k & \vec{0}_{J^k} \\ \vec{0}_{J^{k-1}}^T & 0 \end{pmatrix}, \quad k = \overline{1, n}; \\ N &= \begin{pmatrix} \vec{N} & \vec{0}_{J^n} \\ \vec{0}_{J^n}^T & 0 \end{pmatrix}; \\ \Lambda_k &= \begin{pmatrix} \vec{\Lambda}_k - \alpha E_{J^k} & \alpha \vec{1}_{J^k} \\ \beta \vec{\omega}_k & -\beta \end{pmatrix}, \quad k = \overline{0, n-1}; \\ \Lambda &= \begin{pmatrix} \vec{\Lambda} - \alpha E_{J^n} & \alpha \vec{1}_{J^n} \\ \beta \vec{\omega} & -\beta \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

где

$$\vec{N}_k = \vec{h}^* \otimes E_J \otimes \dots \otimes E_J + E_J \otimes \vec{h}^* \otimes \dots \otimes E_J + \dots + E_J \otimes E_J \otimes \dots \otimes \vec{h}^*, \quad k = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$\vec{N} = (\vec{h}^* \otimes E_J \otimes \dots \otimes E_J + E_J \otimes \vec{h}^* \otimes \dots \otimes E_J + \dots + E_J \otimes E_J \otimes \dots \otimes \vec{h}^*) \otimes \vec{h}; \quad (2)$$

$$\vec{\Lambda}_k = H \otimes E_J \otimes \dots \otimes E_J + E_J \otimes H \otimes \dots \otimes E_J + \dots + E_J \otimes E_J \otimes \dots \otimes H, \quad k = \overline{0, n-1}; \quad (3)$$

$$\vec{\Lambda} = H \otimes E_J \otimes \dots \otimes E_J + E_J \otimes H \otimes \dots \otimes E_J + \dots + E_J \otimes E_J \otimes \dots \otimes H; \quad (4)$$

$$\vec{\omega}_k = \vec{h} \otimes \vec{h} \otimes \dots \otimes \vec{h}, \quad k = \overline{0, n-1}; \quad (5)$$

$$\vec{\omega} = \vec{h} \otimes \vec{h} \otimes \dots \otimes \vec{h}, \quad (6)$$

причем в формулах (1) и (3) k слагаемых, в формулах (2) и (4) n слагаемых, в формуле (5) k сомножителей и в формуле (6) n сомножителей.

Подставляя найденные значения матриц в базовую модель и производя расчеты, находим стационарные вероятности по вложенной цепи Маркова и по времени того, что в системе находятся k заявок, а фазы процессов генерации и обслуживания заявок равны i и j , и стационарное распределение времени ожидания начала обслуживания заявки.

Наконец, обратимся к вычислению стационарного распределения времени пребывания заявки в системе. Для этого введем новые РН-распределения $G_1(x)$ и $G_2(x)$ с $J+1$ фазами обслуживания, одной и той же матрицей

$$G = \begin{pmatrix} H - \alpha E & \alpha \vec{1} \\ \beta \vec{h} & -\beta \end{pmatrix}$$

и векторами $\vec{g}_1 = (0, \dots, 0, 1)$ и $\vec{g}_2 = (h_1, \dots, h_J, 0)$, соответственно. Кроме того, обозначим через \hat{p}_0 сумму всех координат всех векторов \vec{p}_k^* , $k = \overline{1, n}$, соответствующих состояниям, при которых приборы находятся в неисправном состоянии, а через \hat{p}_1 — сумму всех остальных координат этих векторов.

Заметим теперь, что если в момент поступления заявки в систему все приборы заняты, то эта заявка сначала ждет момента поступления на прибор, а затем сразу же начинает обслуживаться (попадая на одну из первых J фаз своего обслуживания). Если же в момент поступления заявки в систему имеется хотя бы один свободный прибор, то заявка занимает один из них и либо сразу же начинает обслуживаться на одной из J фаз (приборы находятся в исправном состоянии), либо (приборы неисправны) ожидает начала обслуживания на этом приборе (будем считать в этом случае, что заявка находится на $(J+1)$ -й фазе).

С учетом сделанных замечаний стационарное распределение времени пребывания заявки в системе можно записать в виде

$$\begin{aligned} V(x) &= \hat{p}_0 G_1(x) + \hat{p}_1 G_2(x) + \\ &+ \int_{0+}^x G_2(x-y) dW(y), \quad x > 0, \quad (7) \end{aligned}$$

в случае бесконечного накопителя и

$$\begin{aligned} V(x) &= \frac{1}{1-\pi} \left(\hat{p}_0 G_1(x) + \hat{p}_1 G_2(x) + \right. \\ &\left. + \int_{0+}^x G_2(x-y) dW(y) \right), \quad x > 0, \quad (8) \end{aligned}$$

в случае конечного накопителя, где $W(x)$ — функция стационарного распределения времени ожидания начала обслуживания заявки, а π — стационарная вероятность потери заявки. Значение $0+$ нижнего предела интегралов означает, что скачок $W(0+) - W(0)$ функции $W(x)$ в интеграле не учитывается.

4 Одновременные отказы всех приборов и дообслуживание заявок

Следующая система, которая будет здесь рассмотрена, отличается от разобранных в предыдущем разделе только тем, что заявка, обслуживание которой было прервано из-за отказа прибора,

после восстановления прибора дообслуживается. Собственно говоря, и ее исследование практически ничем не отличается от исследования предыдущей СМО.

Для приведения рассматриваемой СМО к базовой модели множество состояний на слое k зададим следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_0 &= \{(j)\}; \\ \mathcal{X}_k &= \{(i_1, \dots, i_k; j)\}, \quad k = \overline{1, n-1}; \\ \mathcal{X}_k &= \{(i_1, \dots, i_n; j)\}, \quad k \geq n, \end{aligned}$$

где i_l — значение l -й координаты i_l , $l = \overline{1, k}$ или $l = \overline{1, n}$, мультииндекса (i_1, \dots, i_k) или (i_1, \dots, i_n) показывает фазу обслуживания заявки на l -м приборе, а $j = 1$, если приборы исправны, и $j = 0$, если приборы неисправны.

Определим матрицы марковского процесса обслуживания базовой модели:

$$\begin{aligned} \Omega_k &= \begin{pmatrix} E_{J^k} \otimes \vec{h} & 0_{J^k, J^{k+1}} \\ 0_{J^k, J^{k+1}} & E_{J^k} \otimes \vec{h} \end{pmatrix}, \\ N_k &= \begin{pmatrix} \tilde{N}_k & 0_{J^k, J^{k-1}} \\ 0_{J^k, J^{k-1}} & 0_{J^k, J^{k-1}} \end{pmatrix}, \quad k = \overline{1, n}; \\ N &= \begin{pmatrix} \tilde{N} & 0_{J^n, J^n} \\ 0_{n^J, n^J} & 0_{J^n, J^n} \end{pmatrix}; \\ \Lambda_k &= \begin{pmatrix} \tilde{\Lambda}_k - \alpha E_{J^k} & \alpha E_{J^k} \\ \beta E_{J^k} & -\beta E_{J^k} \end{pmatrix}, \quad k = \overline{0, n-1}; \\ \Lambda &= \begin{pmatrix} \tilde{\Lambda} - \alpha E_{J^n} & \alpha E_{J^n} \\ \beta E_{J^n} & -\beta E_{J^n} \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

где матрицы \tilde{N}_k , \tilde{N} , $\tilde{\Lambda}_k$ и $\tilde{\Lambda}$ определены в предыдущем разделе формулами (1)–(6).

Теперь, как и в предыдущем разделе, из базовой модели находятся стационарные вероятности по вложенной цепи Маркова и по времени того, что в системе имеется k заявок, а фазы процессов генерации и обслуживания заявок равны i и j , и стационарное распределение времени ожидания начала обслуживания заявки.

Стационарное распределение времени пребывания заявки в системе вычисляется по формулам (7) и (8), где вероятности \hat{p}_0 и \hat{p}_1 имеют прежний смысл, а РН-распределения $G_1(x)$ и $G_2(x)$ с $2J$ фазами определяются матрицей

$$G = \begin{pmatrix} H - \alpha E & \alpha E \\ \beta E & -\beta E \end{pmatrix}$$

и векторами $\vec{g}_1 = (0, \dots, 0, h_1, \dots, h_J)$ и $\vec{g}_2 = (h_1, \dots, h_J, 0, \dots, 0)$.

5 Одновременные отказы занятых приборов и обслуживание заявок заново, свободные приборы находятся только в исправном состоянии

Особенностями функционирования модели, рассмотренной в этом разделе, являются:

- занятые приборы отказывают одновременно с интенсивностью α и одновременно восстанавливаются с интенсивностью β , свободные приборы находятся только в исправном состоянии;
- заявка, поступающая в систему, начинает обслуживаться на свободном приборе, если таковой имеется, в противном случае попадает в накопитель (для системы с конечным накопителем может также потеряться);
- если занятые приборы восстанавливаются и до момента окончания их восстановления в систему поступают еще заявки, которые начинают обслуживаться на свободных приборах, то приборы с этими вновь поступившими заявками также могут отказать с интенсивностью α , присоединившись к ранее отказавшим приборам. При этом восстановление происходит одновременно для всех приборов с интенсивностью β вне зависимости от того, в какой именно момент они отказали;
- процесс восстановления неисправных приборов не влияет на процесс обслуживания исправными приборами;
- заявки, обслуживание которых было прервано отказами приборов, после восстановления приборов обслуживаются заново.

Заметим, что рассматриваемая в этом разделе модель с отказами функционирует таким образом, что, помимо нескольких исправных занятых приборов, могут восстанавливаться еще несколько приборов с заявками. Такая ситуация принципиально невозможна для моделей, рассмотренных выше.

Назовем слоем k , $k \geq 0$, множество всех состояний процесса обслуживания, в которых общее число заявок в системе равно k , причем состояние слоя k , при котором нет исправных приборов с заявками, будем обозначать через (0).

Слой k при $k = \overline{0, n-1}$ представляет собой множество

$$\mathcal{X}_k = \{(i_1, \dots, i_m), \quad m = \overline{0, k}\}.$$

Состояние (i_1, \dots, i_m) означает, что первый прибор обслуживает заявку на фазе i_1 , ..., m -й прибор —

на фазе i_m , а $(k - m)$ приборов с заявками восстанавливаются.

Слой k при $k \geq n$ имеет вид

$$\mathcal{X}_k = \{(i_1, \dots, i_m), m = \overline{0, n}\}.$$

Состояние (i_1, \dots, i_m) означает, что первый прибор обслуживает заявку на фазе i_1 , ..., m -й прибор — на фазе i_m , остальные $(n - m)$ приборов с заявками восстанавливаются и еще $(k - n)$ заявок находятся в накопителе.

Далее условимся обозначать через $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $l = \overline{1, m}$, состояние, при котором занято обслуживанием m приборов (число свободных приборов и число заявок в очереди определяются слоем), причем первый прибор находится на фазе i_1 , второй — на фазе i_2 , ..., $(l - 1)$ -й — на фазе i_{l-1} , l -й — на фазе i , $(l + 1)$ -й — на фазе i_l , ..., m -й — на фазе i_{m-1} .

Предполагая, что новые заявки в систему не поступают, перечислим все возможные переходы между состояниями при обслуживании заявок с указанием интенсивностей переходов.

Начнем с переходов из-за изменения фазы обслуживания заявки:

- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $m = \overline{1, k}$, слоя k , $k = \overline{1, n - 1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, j^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $j \neq i$, того же слоя с интенсивностью h_{ij} при изменении фазы обслуживания заявки на l -м приборе с i -й на j -ю;
- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $m = \overline{1, n}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, j^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $j \neq i$, того же слоя с интенсивностью h_{ij} при изменении фазы обслуживания заявки на l -м приборе с i -й на j -ю.

Следующий тип переходов — при отказах исправных приборов с заявками:

- из состояния (i_1, \dots, i_m) , $m = \overline{1, k}$, слоя k , $k = \overline{1, n - 1}$, возможен переход в состояние (0) того же слоя с интенсивностью α при отказе исправных занятых приборов;
- из состояния (i_1, \dots, i_m) , $m = \overline{1, n}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние (0) того же слоя с интенсивностью α при отказе исправных занятых приборов.

Аналогично определяются переходы при восстановлении приборов:

- из состояния (i_1, \dots, i_m) , $m = \overline{0, k - 1}$, слоя k , $k = \overline{1, n - 1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_{k-m})$ того же слоя с интенсивностью $\beta h_{j_1} \dots h_{j_{k-m}}$ при восстановлении приборов;

- из состояния (i_1, \dots, i_m) , $m = \overline{0, n - 1}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_{n-m})$ того же слоя с интенсивностью $\beta h_{j_1} \dots h_{j_{n-m}}$ при восстановлении приборов.

Следующие переходы происходят при окончании обслуживания заявки:

- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $m = \overline{1, k}$, $l = \overline{1, m}$, слоя k , $k = \overline{1, n}$, возможен переход в состояние (i_1, \dots, i_{m-1}) слоя $(k - 1)$ с интенсивностью h_i^* при окончании обслуживания заявки на l -м приборе при i -й фазе;
- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $m = \overline{1, n}$, $l = \overline{1, m}$, слоя k , $k > n$, возможен переход в состояние (i_1, \dots, i_{m-1}, j) слоя $(k - 1)$ с интенсивностью $h_i^* h_j$ при окончании обслуживания заявки на l -м приборе при i -й фазе и поступлении на него новой заявки из очереди на j -ю фазу.

Осталось определить вероятности изменения состояний процесса обслуживания в момент поступления в систему заявки, т.е. элементы матриц Ω_l , $l = \overline{0, n - 1}$:

- из состояния (i_1, \dots, i_m) , $m = \overline{0, k}$, слоя k , $k = \overline{0, n - 1}$, процесс обслуживания при поступлении заявки переходит в состояние (i_1, \dots, i_m, i) слоя $k + 1$ с вероятностью h_i того, что поступающая в систему заявка начнет обслуживаться с фазы i .

Теперь, сформировав матрицы Λ_k , N_k и Ω_k базовой модели и воспользовавшись формулами для ее расчета, можно найти стационарные вероятности по вложенной цепи Маркова и по времени того, что в системе имеется k заявок, а фазы процессов генерации и обслуживания заявок равны i и j , и стационарное распределение времени ожидания начала обслуживания заявки.

Стационарное распределение $V(x)$ времени пребывания заявки в системе определяется соотношением

$$V(x) = \int_0^x W(x - y) dG(y) \quad (9)$$

в случае бесконечного накопителя и

$$V(x) = \frac{1}{1 - \pi} \left((\hat{p}_0 + \hat{p}_1) G(x) + \int_{0+}^x G(x - y) dW(y) \right), \quad x > 0, \quad (10)$$

в случае конечного накопителя, где вероятности \hat{p}_0 и \hat{p}_1 те же самые, что и в разделе 3, а $G(x)$ — функция распределения фазового типа с матрицей

$$G = \begin{pmatrix} H - \alpha E & \alpha \bar{1} \\ \beta \bar{h} & -\beta \end{pmatrix}$$

и вектором $\bar{g} = (h_1, \dots, h_J, 0)$.

6 Независимые отказы свободных и занятых приборов и обслуживание заявок заново, заявки поступают на все приборы

Следующая СМО имеет такие особенности:

- все занятые приборы отказывают одновременно с интенсивностью α и одновременно восстанавливаются с интенсивностью β ;
- все свободные приборы отказывают одновременно с интенсивностью α^* и одновременно восстанавливаются с интенсивностью β^* ;
- одновременные отказы и восстановления занятых приборов и одновременные отказы и восстановления свободных приборов происходят независимо друг от друга;
- если в системе имеются исправные свободные приборы, то поступающая заявка становится на один из таких приборов. Если есть только неисправные свободные приборы, то заявка становится на неисправный свободный прибор, причем такой прибор с заявкой восстанавливается уже одновременно со всеми неисправными занятыми приборами с интенсивностью β . Наконец, если вообще нет свободных приборов, заявка попадает в накопитель (или даже теряется);
- заявки, обслуживание которых было прервано отказами приборов, после восстановления приборов обслуживаются заново.

Определим слои, на которых может находиться процесс обслуживания, следующим образом.

Слой k при $k = \overline{0, n-1}$ представляет собой множество

$$\mathcal{X}_k = \{(i_1, \dots, i_m; j), m = \overline{0, k}, j = \overline{0, n-k}\}.$$

Состояние $(i_1, \dots, i_m; j)$ означает, что m приборов обслуживают заявки на фазах i_1, \dots, i_m , $(k-m)$ приборов с заявками восстанавливаются, j свободных приборов исправны и $(n-k-j)$ свободных

приборов восстанавливаются. Состояние слоя k , при котором k приборов с заявками восстанавливаются и j свободных приборов исправны, будем обозначать через $(0; j)$.

Слой k при $k \geq n$ имеет вид

$$\mathcal{X}_k = \{(i_1, \dots, i_m), m = \overline{0, n}\}.$$

Состояние (i_1, \dots, i_m) означает, что m приборов исправны и обслуживают заявки на фазах i_1, \dots, i_m , $(n-m)$ приборов с заявками восстанавливаются и еще $(k-n)$ заявок находятся в накопителе. Состояние слоя k , при котором n приборов с заявками восстанавливаются, будем обозначать через (0) .

Далее условимся обозначать через $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $l = \overline{1, m}$, состояние слоя k , $k \geq n$, при котором все приборы исправны, причем первый прибор находится на фазе i_1 , второй — на фазе $i_2, \dots, (l-1)$ -й — на фазе i_{l-1} , l -й — на фазе i , $(l+1)$ -й — на фазе i_l, \dots, m -й — на фазе i_{m-1} . Аналогичным образом определяется состояние $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j)$ слоя k , $k = \overline{0, n-1}$.

Перечислим все возможные переходы между состояниями при обслуживании заявок (предполагается, что новые заявки в систему не поступают) с указанием интенсивностей переходов.

Начнем с переходов из-за изменения фазы обслуживания заявки:

- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; d)$, $m = \overline{0, k}$, $d = \overline{0, n-k}$, слоя k , $k = \overline{1, n-1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, j^{(l)}, \dots, i_{m-1}; d)$, $j \neq i$, того же слоя с интенсивностью h_{ij} при изменении фазы обслуживания заявки на l -м приборе с i -й на j -ю;
- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $m = \overline{0, n}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, j^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $j \neq i$, того же слоя с интенсивностью h_{ij} при изменении фазы обслуживания заявки на l -м приборе с i -й на j -ю.

Следующий тип переходов связан с отказами приборов с заявками:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; d)$, $m = \overline{1, k}$, $d = \overline{0, n-k}$, слоя k , $k = \overline{1, n-1}$, возможен переход в состояние $(0; d)$ того же слоя с интенсивностью α при отказе всех приборов;
- из состояния (i_1, \dots, i_m) , $m = \overline{1, n}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние (0) того же слоя с интенсивностью α при отказе всех приборов.

Аналогично определяются переходы из-за отказов приборов без заявок:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; d)$, $m = \overline{1, k}$, $d = \overline{1, n - k}$, слоя k , $k = \overline{1, n - 1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_m; 0)$ того же слоя с интенсивностью α^* при отказе всех приборов.

Переходы при восстановлении приборов с заявками определяются следующим образом:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; d)$, $m = \overline{1, k}$, $d = \overline{0, n - k}$, слоя k , $k = \overline{1, n - 1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_k; d)$ того же слоя с интенсивностью $\beta h_{i_{m+1}} \dots h_{i_k}$ при восстановлении всех приборов;
- из состояния (i_1, \dots, i_m) , $m = \overline{1, n}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние (i_1, \dots, i_n) того же слоя с интенсивностью $\beta h_{i_{m+1}} \dots h_{i_n}$ при восстановлении всех приборов.

Переходы при восстановлении приборов без заявок определяются так:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; d)$, $m = \overline{0, k}$, $d = \overline{0, n - k}$, слоя k , $k = \overline{1, n - 1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_m; n - k)$ того же слоя с интенсивностью β^* при восстановлении всех приборов.

Следующие переходы происходят при окончательном обслуживании заявок:

- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; d)$, $m = \overline{1, k}$, $d = \overline{0, n - k}$, слоя k , $k = \overline{1, n}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_{m-1}; d + 1)$ слоя $(k - 1)$ с интенсивностью h_i^* при окончании обслуживания заявки на l -м приборе при i -й фазе;
- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1})$, $m = \overline{1, n}$, слоя k , $k > n$, возможен переход в состояние (i_1, \dots, i_{m-1}, j) слоя $(k - 1)$ с интенсивностью $h_i^* h_j$ при окончании обслуживания заявки на l -м приборе при i -й фазе и поступлении на него новой заявки из очереди на j -ю фазу.

Определим ненулевые элементы матриц Ω_l , $l = \overline{0, n - 1}$:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; d)$, $m = \overline{1, k}$, $d = \overline{1, n - k}$, слоя k , $k = \overline{0, n - 1}$, при поступлении заявки процесс обслуживания заявок переходит в состояние $(i_1, \dots, i_m, i; d - 1)$, $m = \overline{1, n}$, слоя $k + 1$ с вероятностью h_i того, что поступающая в систему заявка начнет обслуживаться с фазы i .

Найдя таким образом матрицы Λ_k , $k = \overline{0, n - 1}$, Λ , N_k , $k = \overline{1, n}$, N и Ω_k , $k = \overline{0, n - 1}$, базовой модели, можно воспользоваться результатами для базовой системы для вычисления стационарных вероятностей по вложенной цепи Маркова и по времени того, что в системе имеется k заявок, а фазы процессов генерации и обслуживания заявок равны i и j , и стационарного распределения времени ожидания начала обслуживания заявки.

Стационарное распределение времени пребывания заявки в системе можно вычислить по формулам (7) и (8), где вероятности \hat{p}_1 и \hat{p}_2 и распределения фазового типа $G_1(x)$ и $G_2(x)$ находятся так же, как и в разделе 3.

7 Одновременные отказы занятых приборов и дообслуживание заявок, свободные приборы находятся только в исправном состоянии

Рассматриваемый в этом разделе вариант системы характеризуется следующими особенностями:

- занятые приборы отказывают одновременно с интенсивностью α и затем одновременно восстанавливаются с интенсивностью β , свободные приборы находятся только в исправном состоянии;
- заявка, поступающая в систему, начинает обслуживаться на свободном приборе, если таковой имеется, или же попадает в накопитель (или теряется);
- если занятые приборы восстанавливаются и до момента окончания восстановления в систему поступают заявки, которые начинают обслуживаться на свободных приборах, то приборы с этими поступившими заявками также могут (одновременно) отказаться с интенсивностью α , присоединившись к ранее отказавшим приборам. При этом восстановление происходит одновременно для всех приборов с интенсивностью β вне зависимости от того, в какой именно момент они отказали;
- процесс восстановления неисправных приборов не влияет на процесс обслуживания исправных приборов;
- заявки, обслуживание которых было прервано отказами приборов, после восстановления приборов дообслуживаются.

Назовем слоем k , $k \geq 0$, множество всех состояний процесса обслуживания, в которых общее число заявок в системе равно k .

Слой k при $k = \overline{0, n - 1}$ представляет собой множество

$$\mathcal{X}_k = \{(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}), m = \overline{0, k}\}.$$

Состояние $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m})$ означает, что первый прибор обслуживает заявку на фазе $i_1, \dots,$

m -й прибор — на фазе i_m , а $(k - m)$ приборов с заявками восстанавливаются, прервав обслуживание заявок на фазах j_1, \dots, j_{k-m} , соответственно.

Слой k при $k \geq n$ имеет вид

$$\mathcal{X}_k = \{(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{n-m}), m = \overline{0, n}\}.$$

Состояние $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{n-m})$ означает, что первый прибор обслуживает заявку на фазе i_1 , ..., m -й прибор — на фазе i_m , остальные $(n - m)$ приборов с заявками восстанавливаются, прервав обслуживание заявок на фазах j_1, \dots, j_{n-m} , соответственно, и еще $(k - n)$ заявок находятся в накопителе.

Далее условимся обозначать через $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_r)$, $l = \overline{1, m}$, состояние, при котором занято обслуживанием m приборов, причем первый прибор находится на фазе i_1 , второй — на фазе i_2 , ..., $(l - 1)$ -й — на фазе i_{l-1} , l -й — на фазе i , $(l + 1)$ -й — на фазе i_l , ..., m -й — на фазе i_{m-1} , и еще r приборов с заявками восстанавливаются, прервав обслуживание заявок на фазах j_1, \dots, j_r . Состояние слоя k , при котором все приборы с заявками восстанавливаются, будем обозначать через $(0; j_1, \dots, j_k)$ при $k = \overline{0, n - 1}$ и через $(0; j_1, \dots, j_n)$ при $k \geq n$. Состояние слоя k , при котором все приборы с заявками исправны, будем обозначать через $(i_1, \dots, i_k; 0)$ при $k = \overline{0, n - 1}$ и через $(i_1, \dots, i_n; 0)$ при $k \geq n$.

Предполагая, что новые заявки в систему не поступают, перечислим все возможные переходы между состояниями при обслуживании заявок с указанием интенсивностей переходов.

Начнем с переходов из-за изменения фазы обслуживания заявок:

- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{k-m})$, $m = \overline{1, k}$, слоя k , $k = \overline{1, n - 1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, j^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{k-m})$, $j \neq i$, того же слоя с интенсивностью h_{ij} при изменении фазы обслуживания заявки на l -м приборе с i -й на j -ю;
- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{n-m})$, $m = \overline{1, n}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, j^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{n-m})$, $j \neq i$, того же слоя с интенсивностью h_{ij} при изменении фазы обслуживания заявки на l -м приборе с i -й на j -ю.

Следующий тип переходов образуется при отказах исправных приборов с заявками:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m})$, $m = \overline{1, k}$, слоя k , $k = \overline{1, n - 1}$, возможен переход в состояние $(0; i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_{k-m})$ того же слоя с интенсивностью α при отказе исправных занятых приборов;

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{n-m})$, $m = \overline{1, n}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние $(0; i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_{n-m})$ того же слоя с интенсивностью α при отказе исправных занятых приборов.

Аналогично определяются переходы при восстановлении приборов:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m})$, $m = \overline{0, k - 1}$, слоя k , $k = \overline{1, n - 1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_{k-m}; 0)$ того же слоя с интенсивностью β при восстановлении приборов;
- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{n-m})$, $m = \overline{0, n - 1}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_{n-m}; 0)$ того же слоя с интенсивностью β при восстановлении приборов.

Следующие переходы происходят при окончании обслуживания заявок:

- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{k-m})$, $m = \overline{1, k}$, слоя k , $k = \overline{1, n}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{k-m})$ слоя $(k - 1)$ с интенсивностью h_i^* при окончании обслуживания заявки на l -м приборе при i -й фазе;
- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{n-m})$, $m = \overline{1, n}$, слоя k , $k > n$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_{m-1}; j; j_1, \dots, j_{n-m})$ слоя $(k - 1)$ с интенсивностью $h_i^* h_j$ при окончании обслуживания заявки на l -м приборе при i -й фазе и поступлении на него новой заявки из очереди на j -ю фазу.

Осталось определить вероятности изменения состояний процесса обслуживания в моменты поступления в систему заявок, т.е. элементы матриц Ω_l , $l = \overline{0, n - 1}$:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m})$, $m = \overline{0, k}$, слоя k , $k = \overline{0, n - 1}$, при поступлении заявки процесс обслуживания переходит в состояние $(i_1, \dots, i_m, i; j_1, \dots, j_{k-m})$ слоя $k + 1$ с вероятностью h_i того, что поступающая в систему заявка начнет обслуживаться с фазы i .

Сформировав матрицы Λ_k , N_k и Ω_k , можно, как и прежде, воспользоваться формулами для расчета характеристик базовой модели с отказами.

Стационарное распределение времени пребывания заявки в системе вычисляется по формулам (9) и (10), в которых параметры функции распределения фазового типа $G(x)$ имеют вид

$$G = \begin{pmatrix} H - \alpha E & \alpha E \\ \beta E & -\beta E \end{pmatrix}, \quad \vec{g}_2 = (h_1, \dots, h_J, 0, \dots, 0).$$

8 Независимые одновременные отказы занятых и свободных приборов и дообслуживание заявок, заявки поступают на все приборы

Наконец, последняя рассматриваемая здесь система имеет следующие особенности:

- все занятые приборы отказывают одновременно с интенсивностью α и одновременно восстанавливаются с интенсивностью β ;
- все свободные приборы отказывают одновременно с интенсивностью α^* и одновременно восстанавливаются с интенсивностью β^* ;
- одновременные отказы и восстановления занятых приборов и одновременные отказы и восстановления свободных приборов происходят независимо друг от друга;
- если в системе имеются исправные свободные приборы, поступающая заявка становится на один из таких приборов, иначе (если нет исправных свободных приборов, но имеются неисправные свободные приборы) становится на неисправный свободный прибор, который восстанавливается уже с интенсивностью β ;
- заявки, обслуживание которых было прервано отказами приборов, после восстановления приборов дообслуживаются.

Определим слои, на которых может находиться процесс обслуживания, следующим образом.

Слой k при $k = \overline{0, n-1}$ представляет собой множество

$$\mathcal{X}_k = \{(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; j), m = \overline{0, k}, j = \overline{0, n-k}\}.$$

Состояние $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; j)$ означает, что m приборов обслуживают заявки на фазах i_1, \dots, i_m и $(k-m)$ приборов с заявками прервали обслуживание на фазах j_1, \dots, j_{k-m} и восстанавливаются, j свободных приборов исправны, $(n-k-j)$ свободных приборов восстанавливаются. Состояние слоя k , при котором k приборов с заявками восстанавливаются, прервав обслуживание на фазах j_1, \dots, j_k , и j свободных приборов исправны, будем обозначать через $(0; j_1, \dots, j_k; j)$, а состояние слоя k , при котором k исправных приборов обслуживают заявки на фазах j_1, \dots, j_k и j свободных приборов исправны, будем обозначать через $(j_1, \dots, j_k; 0; j)$.

Слой k при $k \geq n$ имеет вид

$$\mathcal{X}_k = \{(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{n-m}), m = \overline{0, n}\}.$$

Состояние $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{n-m})$ означает, что m приборов исправны и обслуживают заявки на фазах i_1, \dots, i_m , $(n-m)$ приборов с заявками прервали обслуживание заявок на фазах j_1, \dots, j_{n-m} и восстанавливаются и еще $(k-n)$ заявок находятся в накопителе. Состояние слоя k , при котором n приборов с заявками восстанавливаются, прервав обслуживание на фазах j_1, \dots, j_n , будем обозначать через $(0; j_1, \dots, j_n)$, а состояние слоя k , при котором все приборы исправны и обслуживают заявки на фазах j_1, \dots, j_k , будем обозначать через $(j_1, \dots, j_n; 0)$.

Далее условимся при $k \geq n$ обозначать через $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{n-m})$, $l = \overline{1, m}$, состояние, при котором m приборов исправны, причем первый прибор находится на фазе i_1 , второй — на фазе $i_2, \dots, (l-1)$ -й — на фазе i_{l-1} , l -й — на фазе i , $(l+1)$ -й — на фазе i_l, \dots, m -й — на фазе i_{m-1} и еще $(n-m)$ приборов восстанавливаются, прервав обслуживание на фазах j_1, \dots, j_{k-m} . Аналогичным образом при $k = \overline{0, n-1}$ определяется состояние $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_s; j)$.

Перечислим все возможные переходы между состояниями при обслуживании заявок (предполагается, что новые заявки в систему не поступают) с указанием интенсивностей переходов.

Начнем с переходов из-за изменения фазы обслуживания заявки:

- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{k-m}; d)$, $l = \overline{1, m}$, $d = \overline{0, n-k}$, слоя k , $k = \overline{1, n-1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, j^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{k-m}; d)$, $j \neq i$, того же слоя с интенсивностью h_{ij} при изменении фазы обслуживания заявки на l -м приборе с i -й на j -ю;
- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{n-m})$, $l = \overline{1, m}$, слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, j^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{n-m})$, $j \neq i$, того же слоя с интенсивностью h_{ij} при изменении фазы обслуживания заявки на l -м приборе с i -й на j -ю.

Следующий тип переходов происходит из-за отказов приборов с заявками:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; d)$, $d = \overline{0, n-k}$, слоя k , $k = \overline{1, n-1}$, возможен переход в состояние $(0; i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_{k-m}; d)$ того же слоя с интенсивностью α при отказе исправных приборов с заявками;
- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{n-m})$ слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние $(0; i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_{n-m})$ того же слоя с интенсивностью α при отказе исправных приборов с заявками.

Аналогично определяются переходы из-за отказа приборов без заявок:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; d)$, $d = \overline{1, n-k}$, слоя k , $k = \overline{1, n-1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; 0)$ того же слоя с интенсивностью α^* при отказе исправных свободных приборов.

Переходы при восстановлении приборов с заявками определяются следующим образом:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; d)$, $d = \overline{0, n-k}$, слоя k , $k = \overline{1, n-1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_k, j_1, \dots, j_{k-m}; 0; d)$ того же слоя с интенсивностью β при восстановлении всех неисправных приборов с заявками;
- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{n-m})$ слоя k , $k \geq n$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_{n-m}; 0)$ того же слоя с интенсивностью β при восстановлении всех неисправных приборов с заявками.

Переходы при восстановлении приборов без заявок определяются следующим образом:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; d)$, $d = \overline{0, n-k-1}$, слоя k , $k = \overline{1, n-1}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; n-k)$ того же слоя с интенсивностью β^* при восстановлении всех неисправных приборов без заявок.

Следующие переходы происходят при окончании обслуживания заявки:

- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{k-m}; d)$, $d = \overline{0, n-k}$, $l = \overline{1, m}$, слоя k , $k = \overline{1, n}$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{k-m}; d+1)$ слоя $(k-1)$ с интенсивностью h_i^* при окончании обслуживания заявки на l -м приборе при i -й фазе;
- из состояния $(i_1, \dots, i^{(l)}, \dots, i_{m-1}; j_1, \dots, j_{n-m})$, $l = \overline{1, m}$, слоя k , $k > n$, возможен переход в состояние $(i_1, \dots, i_{m-1}, j; j_1, \dots, j_{n-m})$ слоя $(k-1)$ с интенсивностью $h_i^* h_j$ при окончании обслуживания заявки на l -м приборе при i -й фазе и поступлении на него новой заявки из очереди на j -ю фазу.

Определим ненулевые элементы матриц Ω_l , $l = \overline{0, n-1}$:

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; d)$, $d = \overline{1, n-k}$, слоя k , $k = \overline{0, n-1}$, при поступлении заявки процесс обслуживания заявок переходит в состояние $(i_1, \dots, i_m, i; j_1, \dots, j_{k-m}; d-1)$ слоя

$k+1$ с вероятностью h_i того, что поступающая в систему заявка начнет обслуживаться с фазы i ;

- из состояния $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}; 0)$ слоя k , $k = \overline{0, n-1}$, при поступлении заявки процесс обслуживания заявок переходит в состояние $(i_1, \dots, i_m; j_1, \dots, j_{k-m}, j; 0)$ слоя $k+1$ с вероятностью h_j того, что поступающая в систему заявка (после восстановления неисправных приборов с заявками) начнет обслуживаться с фазы j .

Найдя таким образом матрицы Λ_k , $k = \overline{0, n-1}$, Λ , N_k , $k = \overline{1, n}$, N и Ω_k , $k = \overline{0, n-1}$, снова можно воспользоваться результатами раздела 2 для отыскания стационарных характеристик системы.

Стационарное распределение $V(x)$ времени пребывания заявки в системе вычисляется точно так же, как и в разделе 4.

9 Заключение

Получены математические соотношения для расчета стационарных характеристик СМО с полумарковским входящим потоком, обслуживанием фазового типа и ненадежными приборами. Рассмотрены различные варианты функционирования СМО с одновременно отказывающимися приборами при экспоненциальном процессе отказов–восстановлений. Для некоторых типов СМО с ненадежными приборами на основе полученных в настоящей работе результатов были написаны программные модули расчета основных показателей функционирования.

Литература

1. Печинкин А. В., Соколов И. А., Чаплыгин В. В. Многолинейные системы массового обслуживания с независимыми отказами и восстановлениями приборов // Системы и средства информатики. Спец. выпуск «Математическое и алгоритмическое обеспечение информационно-телекоммуникационных систем». — М.: ИПИ РАН, 2006. С. 99–123.
2. Печинкин А. В., Соколов И. А., Чаплыгин В. В. Многолинейная система массового обслуживания с конечным накопителем и ненадежными приборами // Информатика и её применения, 2007. Т. 1. Вып. 1. С. 27–39.
3. Печинкин А. В., Чаплыгин В. В. Стационарные характеристики системы массового обслуживания $SM/MSP/n/r$ // Автоматика и телемеханика, 2004. № 9. С. 85–100.

ПРОГРАММНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОГО WEB-ПОРТАЛА

А. В. Босов¹, А. В. Иванов²

Аннотация: В работе представлено портальное решение, реализованное в рамках программы информатизации РАН. Описана разработанная архитектура информационного портала, обсуждаются основные требования к программному решению, обосновывается выбор базовых технологий.

Ключевые слова: стандарты Интернет; многозвенная архитектура; web-портал; адаптер; технология .NET

1 Введение

Сравнительно недавно проблематике Интернет-порталов уделялось повышенное внимание практически всеми участниками ИТ-сообщества, что связывалось, прежде всего, с грандиозными ожиданиями от применения новой технологии. На сегодняшний момент можно констатировать, что тенденции развития порталных технологий свидетельствуют о замедлении процесса интенсивного роста. Первоначальный ажиотаж фактически сошел на нет, сократилось число участников рынка порталных решений [1], количество инновационных решений в новых версиях продуктов ведущих производителей невелико.

Основной причиной неоправданных ожиданий, по-видимому, можно считать трудности, с которыми сталкиваются пользователи «коробочных» решений, пытающиеся применять их в своих целях, высокие требования к уровню квалификации обслуживающего и эксплуатирующего персонала и т. д. Однако вместе с тем изменился и подход к использованию порталных решений — теперь они рассматриваются как часть более крупных систем (например, систем управления предприятием), а не как самостоятельный продукт. При этом портал становится тем, ради чего и создавался, — инструментом для решения вполне определенной задачи создания единой «точки доступа» к различным данным и сервисам в рамках унифицированного web-интерфейса. Таким образом, для потребителей становится осознанной реальная ценность портала как инструмента web-интеграции в широком смысле. Об этой новой тенденции свидетельствует и рост числа внедрений порталов [2].

Однако нельзя признать, что технология порталов достигла высшей точки своего развития. Пред-

ставляется, что отмеченное замедление связано с технологическими трудностями, решение которых могло бы повысить эффективность использования порталов. Так, практически невозможно, не прибегая к программированию, интегрировать в портале информационные системы предприятий, с большими сложностями сопряжено управление неструктурированной и слабоструктурированной информацией, недостаточно развиты средства интеграции web-сайтов. Не всегда эти проблемы может решить потребитель порталного решения, следствием чего являются обращение к производителю для консультаций или разработки дополнительных модулей и дополнительные расходы на эксплуатацию.

Таким образом, необходимость поиска новых решений в технологии порталов очевидна. Именно попытка избежать проблем, присущих известным порталным решениям, и обусловила постановку задачи создания собственного решения в рамках программы информатизации Российской академии наук, действующей с 2002 г. [3]. За время выполнения порталного проекта сложилась представительная кооперация, получены существенные результаты, части которых и посвящена данная работа.

Созданное в РАН порталное решение изначально проектировалось с целью интеграции множества источников слабоструктурированной информации, прежде всего научной тематики. Поскольку существующие классификации порталов не позволяли однозначно отнести разработанную web-систему к одному из классов, для ее обозначения использован термин «информационный web-портал» [3–5], под которым понимается web-система:

— обеспечивающая возможность предоставления информации по большому набору взаимосвяза-

¹Институт проблем информатики Российской академии наук, AVBosov@ipiran.ru

²Институт проблем информатики Российской академии наук, AIVanov@ipiran.ru

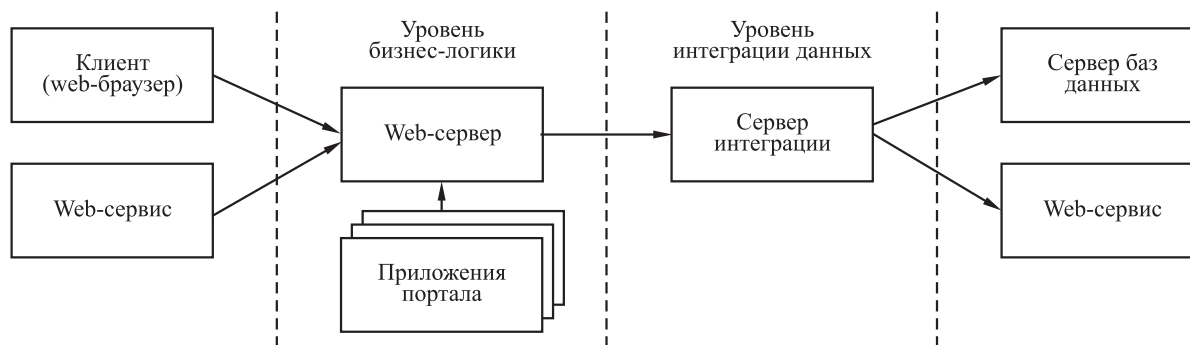


Рис. 1 Многозвенная архитектура портала

- обладающая способностью предоставлять интерактивные услуги как пользователям, так и другим web-системам;
- способная обрабатывать разнородную информацию, поступающую из различных информационных источников;
- имеющая средства интеграции с информационными источниками, позволяющие объединять схемы данных, системы защиты и поиска;
- способная работать как со структурированными, так и с неструктурированными и/или слабоструктурированными данными.

Далее описывается архитектура и особенности программной инфраструктуры информационного web-портала.

2 Постановка задачи и общая схема решения

В процессе работы над проектом информационного web-портала сформировался следующий список основных требований, которым должно удовлетворять создаваемое решение:

- разделение оформления и информационного содержания формируемых web-страниц;
- возможность повторного использования программного кода, формирующего контент на web-страницах;
- возможность формирования содержания страниц как сочетания статической (редко меняющейся) и динамической (генерируемой при обращении к службам или web-сервисам) информации;

- возможность унификации работы с различными информационными источниками (файлами, базами данных, web-сервисами, прикладными информационными системами);
- гибкость в управлении конфигурацией web-системы;
- возможность расширения функциональности системы за счет подключения новых информационных источников, компонентов и модулей, не затрагивая уже существующих и не меняя механизмов работы с данными;
- обеспечение управления информационным порталом с помощью web-интерфейса;
- комплексное обеспечение безопасности web-системы;
- поддержка современных стандартов представления и обработки данных (XML, SOAP, RSS и пр.).

Из перечисленных требований наиболее «тяжелым», несомненно, является возможность эффективного взаимодействия с множеством разнородных источников информации. Для достижения максимальной гибкости при поддержке взаимодействия с источниками целесообразно выделение отдельного уровня программной инфраструктуры. Кроме того, любая web-система как система с тонким клиентом требует выделения отдельного уровня для серверной бизнес-логики портала. С учетом этого для информационного web-портала была выбрана многозвенная клиент-серверная архитектура, означающая, что в программной инфраструктуре явно выделяются два промежуточных уровня: бизнес-логики и интеграции данных. На уровне бизнес-логики выполняются алгоритмы работы с данными. Уровень интеграции данных обеспечивает единый метод доступа к данным, находящимся в различных хранилищах данных либо доступным через вызовы web-сервисов (рис. 1).

3 Реализация требований к portalу

3.1 Разделение оформления и информационного содержания web-страниц

Под оформлением web-страниц понимается не только стиль текстовых и графических элементов сформированной HTML-страницы, но и общие для нескольких страниц элементы пользовательского интерфейса (например, меню, заголовки и т. п.), а также компоновка элементов страницы («модульная сетка»). В такой постановке задача разделения оформления и информационного содержания может быть решена несколькими способами:

- с помощью фреймов HTML, путем разделения элементов пользовательского интерфейса и информационного содержания страницы и размещения их в разных фреймах;
- с помощью клиентского или серверного XSLT-преобразования, заключающегося в применении к информационному содержанию, представленному в формате XML, набора правил, определяющих порядок формирования HTML-представления;
- с помощью шаблонов, содержащих общий для всех web-страниц код и фиксированные позиции для размещения элементов пользовательского интерфейса и информационного содержания страницы.

Перечисленные способы принципиально отличаются как по требованиям, предъявляемым к программной инфраструктуре, так и по условиям применения и решаемым задачам. Так, использование фреймов значительно менее удобно в пользовании по сравнению с другими способами и не позволяет получать удовлетворительные результаты с точки зрения безопасности, а XSLT-преобразование достаточно ресурсоемко и допускает представление входных данных только в формате XML. Перед информационным web-порталом стояла задача обеспечения возможности формирования HTML-страниц с использованием данных из независимых информационных блоков, получаемых из различных источников данных. По этим причинам для минимизации требований к источникам данных — поставщикам контента портала, снижения требований к ресурсам, упрощения управления дизайном в качестве средства разделения оформления и информационного содержания были использованы **шаблоны**.

Сами по себе шаблоны не несут информационного наполнения, они являются лишь контейнером

для блоков информации и элементов пользовательского интерфейса и позволяют избежать дублирования общей информации. С помощью шаблонов могут быть реализованы различные варианты представления одних и тех же данных, например страница может иметь стандартный вид и вид, предназначенный для печати. Использование шаблонов в настоящее время является общепринятым подходом в большинстве web-систем. К сожалению, производители web-технологий (PHP, JSP, ASP и ASP.NET) вплоть до последнего времени не предлагали стандартизованных решений для реализации шаблонов. Все доступные системы (FastTemplate, Jakarta Turbine, ASP Templates) были разработаны либо в рамках движения Open Source, либо сторонними фирмами. В связи с этим подходы к реализации и использованию шаблонов в различных web-системах существенно отличаются. Реализация шаблонов может сводиться к простой подстановке текста, генерации содержимого с помощью различных языков сценариев либо построению шаблонов на основе компонентного подхода.

Следует отметить, что системы для построения сайтов на основе шаблонов, получившие название “web framework”, дополнительно включают прикладные программные интерфейсы, разделение HTML и программного кода и поддержку архитектуры MVC.

Для информационного web-портала был выбран компонентный подход с использованием программных визуальных компонентов. Это обусловлено удобством формирования шаблона из компонентов (не прибегая к написанию программного кода), возможностью программно управлять дизайном страниц, наличием инструментальных средств для визуальной разработки шаблонов и как результат — большей гибкостью решения. В отличие от шаблонов на основе подстановки текста шаблоны на основе компонентного подхода могут программно конфигурироваться, их проще сделать персонализируемыми, а их программный код существенно проще, чем в случае шаблонов, формируемых с помощью сценариев. Шаблоны могут вообще не содержать программного кода, если логика работы страницы может быть обеспечена средствами инфраструктуры портала.

3.2 Повторное использование программного кода

При формировании HTML-страницы для каждого информационного блока или элемента пользовательского интерфейса сервером портала выполняется некоторый программный код, связанный

с соответствующим шаблоном и генерирующий HTML-представление. Поскольку один и тот же код должен выполняться при формировании разных страниц и может использоваться в разных шаблонах, возникает потребность выделить его в самостоятельный программный модуль. Кроме того, необходим механизм для добавления такого программного кода к выбранной странице или шаблону. Решить эту задачу позволяет использование **визуальных компонентов**.

Визуальные компоненты представляют собой программные модули, формирующие фрагменты HTML-представления из блоков информации, полученных в результате выполнения запросов к информационным источникам и службам портала. Визуальные компоненты, по сути, являются частью используемой среды разработки, так как наследуются от определенных классов и имеют поддержку определенных интерфейсов. Визуальные компоненты легко размещаются на страницах и шаблонах, их можно настраивать с помощью стандартных механизмов, можно организовывать обработку событий, генерируемых компонентами в ответ на действия пользователя. В программную инфраструктуру портала включен ряд стандартных компонентов для использования на страницах, другие компоненты могут быть созданы сторонними разработчиками на основе требований, принятых в портале, и интерфейсов, предоставляемых инфраструктурой портала.

Идеология визуальных компонентов используется во многих существующих программных продуктах, например Microsoft Digital Dashboard (DDB). Однако DDB — это технология преимущественно нижнего уровня для связывания рабочего места пользователя с нужными информационными и вычислительными ресурсами. Она требует разработки дополнительных компонентов, чтобы можно было решать поисковые задачи или задачи управления логической структурой страниц. Кроме того, DDB ограничивает клиента использованием строго определенных программных продуктов и необходимостью установки дополнительных клиентских компонентов.

Следует отметить, что реализация визуальных компонентов в информационном web-портале опирается на работу с сервером интеграции — элементом программной инфраструктуры, описанным далее. Здесь же важно отметить, что использование сервера интеграции позволяет разработчикам визуальных компонентов абстрагироваться от деталей работы как с данными, так и с поставляющими их источниками. При этом все возможности программной инфраструктуры портала остаются доступными.

Инфраструктура портала содержит целый ряд технических решений, позволяющих создавать новые компоненты: это и среда разработки, и наличие прикладного программного интерфейса, позволяющего реализовать разграничение доступа, управление оформлением, привязку к источникам данных, а также взаимодействие визуальных компонентов на странице.

3.3 Сочетание статической и динамической информации

На страницах портала должна отображаться как статическая информация, получаемая, например, из файлов или баз данных, так и динамическая, формируемая как результат запроса пользователя к базе данных, web-сервису или прикладной информационной системе, взаимодействующей с порталом. При этом на одной странице должна отображаться информация из нескольких информационных источников.

Эта задача решена в информационном web-портале двумя способами: с помощью визуальных компонентов и **технологии связывания данных** (databind). Визуальные компоненты позволяют формировать на страницах меню, списки новостей, выполнять поисковые запросы. Однако, поскольку набор визуальных компонентов для шаблона фиксирован, возникает потребность в дополнительном механизме для получения данных и их вывода на странице. Для этого создан механизм связывания данных.

Связывание данных — это механизм для выполнения запросов к информационным источникам и помещения их результатов в текст web-страницы с помощью сценария, располагаемого на самой странице. В момент получения текста страницы из информационного источника производится анализ содержащихся в нем сценариев связывания данных, выполнение этих сценариев и подстановка результатов запросов вместо текста сценариев.

Для реализации данного механизма в состав программной инфраструктуры портала введен интерпретатор сценариев, реализованный в составе специального визуального компонента.

3.4 Унификация работы с различными информационными источниками

Для решения задачи поддержки взаимодействия портала с различными информационными источниками (как традиционными базами данных, так и web-сервисами, прикладными информационными системами и т.п.) потребовалась разработка

механизма интеграции данных. В имеющейся реализации информационного web-портала этот механизм включает три составляющих: адаптеры [6], механизм командных запросов и сервер интеграции [7].

Источники информации в портале представлены посредством традиционного механизма **адаптеров**. Адаптер в портале реализует связку «менеджер–ресурс», в которой менеджер ресурса, реализуемый как отдельный программный модуль, играет роль представителя информационного источника в портале и отвечает за взаимодействие программной инфраструктуры портала с ресурсом (конкретным источником информации или службой). Использование адаптеров обеспечивает унификацию доступа к информационным источникам и службам, возможность работы с разнородными источниками информации и гибкого подключения новых источников, позволяет снижать нагрузку на источник информации за счет кэширования данных уже выполненных запросов, а также реализовывать разграничение доступа на уровне отдельных источников информации.

При использовании этого подхода адаптеры должны разрабатываться для всех вновь подключаемых к portalу ресурсов. Для упрощения их создания предпринят ряд шагов, в частности отказ от жесткой стандартизации функциональности адаптеров, наличие нескольких уровней интеграции информационных ресурсов, использование распространенных форматов представления данных.

Механизм командных запросов в инфраструктуре портала используется для работы с данными в информационных источниках. Для чтения, создания, модификации и удаления данных используются командные запросы, которые представляют собой списки команд, представленные в формате XML. Команды связываются с каждым адаптером и в унифицированном виде задают действия, выполняемые для доступа к данным соответствующего информационного источника. Команды могут содержать параметры, что необходимо, к примеру, при доступе к базам данных и другим хранилищам.

Использование такого подхода более удобно, чем фиксация функциональности адаптеров источников данных в стандартизированных и, следовательно, неизменяемых интерфейсах портала, и в то же время не приводит к необходимости реализации прямого доступа к конкретным базам данных и службам, а также обработки данных непосредственно в шаблонах страниц или визуальных компонентах. Поддержка механизма командных запросов реализуется **сервером интеграции**, являющимся частью программной инфраструктуры портала. Этот эле-

мент инфраструктуры обеспечивает поддержку единой в рамках портала схемы данных, получение запросов на доступ к данным и выполнение соответствующих запросу команд адаптерами, сбор и консолидацию результатов выполнения команд.

Имеющаяся на данный момент реализация информационного web-портала уже содержит целый ряд реализованных адаптеров, позволяющих подключать к portalу как стандартные информационные источники (базы данных, web-сервисы), так и специальные системы, к которым в основном относятся прикладные и интегрированные решения, созданные в организациях РАН. Наиболее ярким и многофункциональным из реализованных примеров является компонент, обеспечивающий подключение к portalу и эффективное взаимодействие с ним Интегрированной системы информационных ресурсов РАН [8].

3.5 Управление конфигурацией web-системы

Конфигурационная информация web-системы включает множество параметров различных типов, в том числе и достаточно сложно структурированных, доступ к которым из программного кода должен быть достаточно быстр и удобен. В то же время конфигурационная информация должна быть доступна администратору системы, в связи с чем желательно представление этой информации в человекочитаемой форме. Эти требования несколько противоречат друг другу, поэтому в качестве компромисса было выбрано представление конфигурационной информации на языке XML. Практически все используемые настройки информационного web-портала представлены в этом формате.

Основным элементом конфигурационной информации для портала является **логическая структура страниц**. При отображении web-страниц используется ассоциированный с каждой страницей запрос, содержащий команды на получение информации от информационных источников и служб портала. Страницы, отображаемые средствами информационного web-портала, регистрируются в едином конфигурационном XML-файле, стандартизированном в рамках портала структуры. Конфигурационный файл обеспечивает хранение таких ключевых параметров страницы, как URL, права доступа к странице, ее положение в главном меню, используемый для формирования HTML-страницы шаблон, командный запрос, используемый для получения информационного содержания страницы, описание страницы для карты сайта портала и др.

В конфигурационном файле обеспечена возможность использовать один набор параметров не только для одной страницы, но и для группы страниц. При этом переменная часть URL страницы преобразуется в параметр запроса, передаваемого шаблону. Такая возможность используется при доступе к базам данных и позволяет идентифицировать каждый объект, хранящийся в базе данных, собственным URL.

3.6 Расширение функциональности системы

Наличие средств расширения принципиально важно для информационного web-портала. Очевидно, что интеграция данных не может решить всех задач при подключении нового информационного источника. Например, для навигации по ресурсам информационного источника может потребоваться формирование специального раздела меню внутри существующей в портале логической структуры страниц на основе предоставляемых источником данных. Для отображения ресурсов может потребоваться дополнительный шаблон и т.д. В связи с этим в программной инфраструктуре портала изначально были заложены механизмы расширения функциональности.

В настоящий момент функциональность портала может быть расширена с помощью **внешних модулей**, являющихся, по сути, частью адаптеров, с помощью которых к portalу подключаются источники информации. Эти модули позволяют динамически построить раздел меню на основе полученных из информационного источника данных и подключить дополнительные шаблоны для отображения данных источника. Модули должны поддерживать определенные в программной инфраструктуре интерфейсы, чтобы взаимодействовать с порталом.

3.7 Управление порталом с помощью web-интерфейса

Как и большинство подобных систем, информационный web-портал оснащен web-интерфейсом администрирования — в настоящее время наличие такого интерфейса обязательно для размещения web-систем на необслуживаемых серверах.

Построение пользовательского и административного web-интерфейсов имеет ряд принципиальных отличий от построения интерфейса прикладных программ. Наиболее существенное отличие связано с использованием протокола HTTP, взаимодействие по которому не является непрерывным

(disconnected) и не имеет состояния сеанса (stateless). Web-запрос не несет в себе историю предыдущих запросов.

В связи с этим традиционный для клиентских прикладных программ интерфейс, который отражает предысторию действий пользователя и обеспечивает согласованную обработку данных при использовании нескольких окон приложения, не может быть реализован средствами web-технологий напрямую. Однако существует несколько методов, позволяющих в той или иной мере преодолеть указанную проблему. Это механизм сессий, файлы “cookie”, использование скрытых полей форм и передача состояния через параметры web-запроса.

Сессии пользователей обеспечивают сохранение состояния сеанса в создаваемом на web-сервере объекте. Идентификатор данного объекта передается через заголовок web-запроса или как параметр строки запроса. Эта технология не ограничивает объем сохраняемых данных сеанса и работоспособна при отсутствии или запрещении в web-браузерах поддержки файлов “cookie”. В то же время, данная технология затрудняет масштабирование web-системы, так как сессия пользователя привязана к одному web-серверу и необходимы дополнительные действия для координации одновременной работы группы web-серверов. Кроме того, эта технология поддерживается не всеми web-серверами и требует дополнительных ресурсов web-сервера.

Файлы “cookie” сами по себе могут использоваться для сохранения состояния сеанса. Их использование не создает трудностей для масштабирования системы и не требует специальной поддержки со стороны web-сервера. Однако объем информации, который может быть помещен в заголовках web-запросов, ограничен, а необходимость передачи заголовков в web-запросе увеличивает общее время передачи информации. Кроме того, передача файлов “cookie” может быть запрещена, отсутствовать в клиентских web-браузерах, либо блокироваться брандмауэрами. Тем не менее практика их использования общепринята и чаще всего является оптимальным решением.

Состояние сеанса может сохраняться в **скрытых полях** HTML-форм. Такой вариант применим, только если используется отправка формы на сервер (submit). При переходе по ссылке или перенаправлении запроса на сервере данные полей формы теряются. Однако данный механизм удобен для пошагового заполнения форм и организации серверной обработки событий. Например, технология Microsoft ASP.NET [9] содержит реализацию такого механизма, известную как состояние отображения (ViewState).

Передача состояния сеанса через **параметры строки запроса** не предъявляет специальных требований к web-браузерам и web-серверам и возможна практически в любом случае. Однако объем информации, передаваемой таким образом, минимален из-за ограничения максимальной длины строки запроса (не более 255 символов в большинстве web-браузеров). Кроме того, для передачи данных требуется перекодировка, а сами данные, вследствие открытости для пользователя, легко могут быть изменены.

Технология ASP.NET, которая была использована при реализации обсуждаемого решения, предоставляет необходимые инструменты и классы для использования всех перечисленных методов. Таким образом, в информационном web-портале используется сочетание нескольких методов для сохранения состояния сеанса, выбираемых исходя из простоты и эффективности решения конкретных задач. Именно в зависимости от требований к взаимодействию отдельных элементов интерфейса используются файлы “cookie”, параметры запроса и скрытые поля форм.

Другая проблема построения интерфейса связана с организацией взаимодействия его элементов и, в частности, с использованием нескольких окон для модификации данных. В общем случае окна web-браузера являются независимыми, и если два окна используются для модификации одних и тех же данных, изменения, производимые в одном из окон, не отражаются в другом. В настоящий момент единственным способом организации динамического взаимодействия элементов интерфейса является использование сценариев. К сожалению, уровень поддержки языков сценариев в web-браузерах различных производителей сильно отличается. Недостаточным является и уровень соответствия стандартам. Производители web-браузеров делают акцент на поддержке собственных, несовместимых расширений языков сценариев и тем самым ставят разработчиков сценариев в зависимость от своих продуктов. Это усложняет разработку из-за необходимости создания разных версий сценариев. Но, если число пользователей ограничено, что имеет место в случае административного интерфейса, проще ориентироваться на использование одного web-браузера. Так, административный интерфейс информационного web-портала ориентирован на использование web-браузера Internet Explorer.

Сочетание перечисленных методов сохранения состояния сеанса и динамического взаимодействия элементов интерфейса позволило сделать административный интерфейс достаточно функциональным и удобным и обеспечить удаленное управление информационным web-порталом.

3.8 Обеспечение безопасности web-системы

Наиболее критичная проблема построения web-систем — проблема безопасности. В отличие от локально выполняемой на компьютере программы все данные, передаваемые между сервером и клиентом, потенциально уязвимы. Кроме того, сами данные могут представлять собой большую опасность при отсутствии надлежащего контроля. Язык разметки HTML предоставляет множество способов создания активного содержимого, которое может быть выполнено без участия или с минимальным участием пользователя в web-браузере. Отображение данных, вводимых пользователем и включающих активное содержимое, может причинить различный вред, начиная с повреждения web-страниц и заканчивая кражей данных сеанса других пользователей, в том числе данных аутентификации. При этом использование защищенных протоколов типа HTTPS не является препятствием для активного содержимого [10].

В связи с этим при построении системы безопасности портала решались две задачи [11]: реализация собственно разграничения доступа к информационным ресурсам и защита web-интерфейса.

К вопросам организации системы безопасности относится и такой инструмент интеграции информационных систем, как технология однократной регистрации SSO (Single Sign On). Технология подразумевает создание такой инфраструктуры портала, при которой данные аутентификации пользователя, полученные после однократной регистрации, могут использоваться всеми подсистемами.

При построении системы разграничения доступа было решено отказаться от создания единой системы авторизации, так как практическая реализация такого решения означает вмешательство в системы безопасности всех интегрируемых средствами портала информационных источников. Кроме того, сложность управления подобной централизованной службой оказалась бы слишком велика. В связи с этим программная инфраструктура портала ограничена единым сервисом аутентификации и механизмом авторизации, предоставляющим базовые инструменты для управления ролевой моделью разграничения доступа, позволяющим передать решение задач авторизации на конкретные подсистемы и информационные источники.

Для обеспечения безопасности web-интерфейса в информационном web-портале используется несколько методов [11]. В первую очередь, это использование защищенного протокола HTTPS. Протокол резко снижает вероятность раскрытия

и подмены данных, передаваемых между сервером и клиентом. Во-вторых, это использование цифровой подписи данных состояния сеанса, а также ограничение срока годности этих данных. В-третьих, сочетание фильтров активного содержимого и HTML-кодирования данных, получаемых от пользователя. Цифровая подпись данных сеанса формируется с использованием алгоритмов RSA и SHA1. Фильтры активного содержимого, построенные на основе регулярных выражений, обеспечивают обнаружение и удаление опасных входных данных. HTML-кодирование предотвращает попадание любого HTML-кода в неизменном виде в выходные данные.

3.9 Использование современных стандартов

Отображение HTML-страниц в Информационном web-портале осуществляется в стандарте *HTML 4.01 Transitional*, в ближайших версиях будет обеспечена поддержка стандарта *XHTML 1.0 Transitional*. Для стилизового оформления используется стандарт *CSS 1.0*.

В качестве стандарта для обмена управляющей информацией и обработки данных используется язык *XML*. В частности, для представления командных запросов, хранения параметров конфигурации и при передаче данных адаптеров используются специальные подмножества языка XML, стандартизированные в рамках портала.

В настоящее время использование XML стало общепринятым, что объясняется удобством этого языка для автоматизированной обработки. Немаловажную роль играет и наличие большого количества продуктов, поддерживающих подготовку и обработку представленных в XML данных.

Помимо XML в информационном web-портале используется формат *RSS 2.0* для экспорта новостной информации. Выполнение запросов и обмен информацией с web-сервисами портала производится в формате *SOAP*, описание web-сервисов портала выполнено в стандарте *WSDL*.

4 Архитектура Информационного web-портала

Все перечисленные выше положения нашли свое отражение в существующем программном решении. На основе этих концепций была разработана архитектура решения (рис. 2). На рисунке выделены основные подсистемы информационного web-портала и составляющие их компоненты.

Ключевыми для портала являются сервис аутентификации, система представления и управления контентом, сервер интеграции и файловое хранилище.

Систему аутентификации образуют следующие компоненты [11]:

- сервис аутентификации;
- интерфейс системы аутентификации;
- администратор пользователей.

Систему представления и управления контентом образуют следующие компоненты [5]:

- модуль работы с конфигурационной информацией;
- редактор конфигурационной информации;
- шаблоны представления;
- визуальные компоненты;
- шаблоны редактирования;
- подсистемы администраторов статей, новостей, новостных дайджестов;
- подсистема форума;
- конвертор RSS.

Файловое хранилище образуют следующие компоненты:

- интерфейс файлового хранилища;
- администратор файлового хранилища.

Помимо компонентов подсистем в состав архитектуры портала входят следующие компоненты:

- web-сервер;
- модуль виртуализации путей;
- сервер интеграции;
- сервер командных запросов;
- сервер баз данных;
- служба поиска;
- файловый сервер;
- подключенные к portalу внешние информационные источники;
- подключенные к portalу внешние информационные службы/сервисы.

Ключевой компонент портала — **web-сервер**, обеспечивающий прием запросов, генерируемых web-браузерами пользователей, передачу запросов компонентам портала и возврат клиентам HTML-представления результатов запросов, сформированного компонентами портала. В качестве web-сервера в рассматриваемом решении используется Microsoft Internet Information Services. Системы представления и управления контентом и файло-

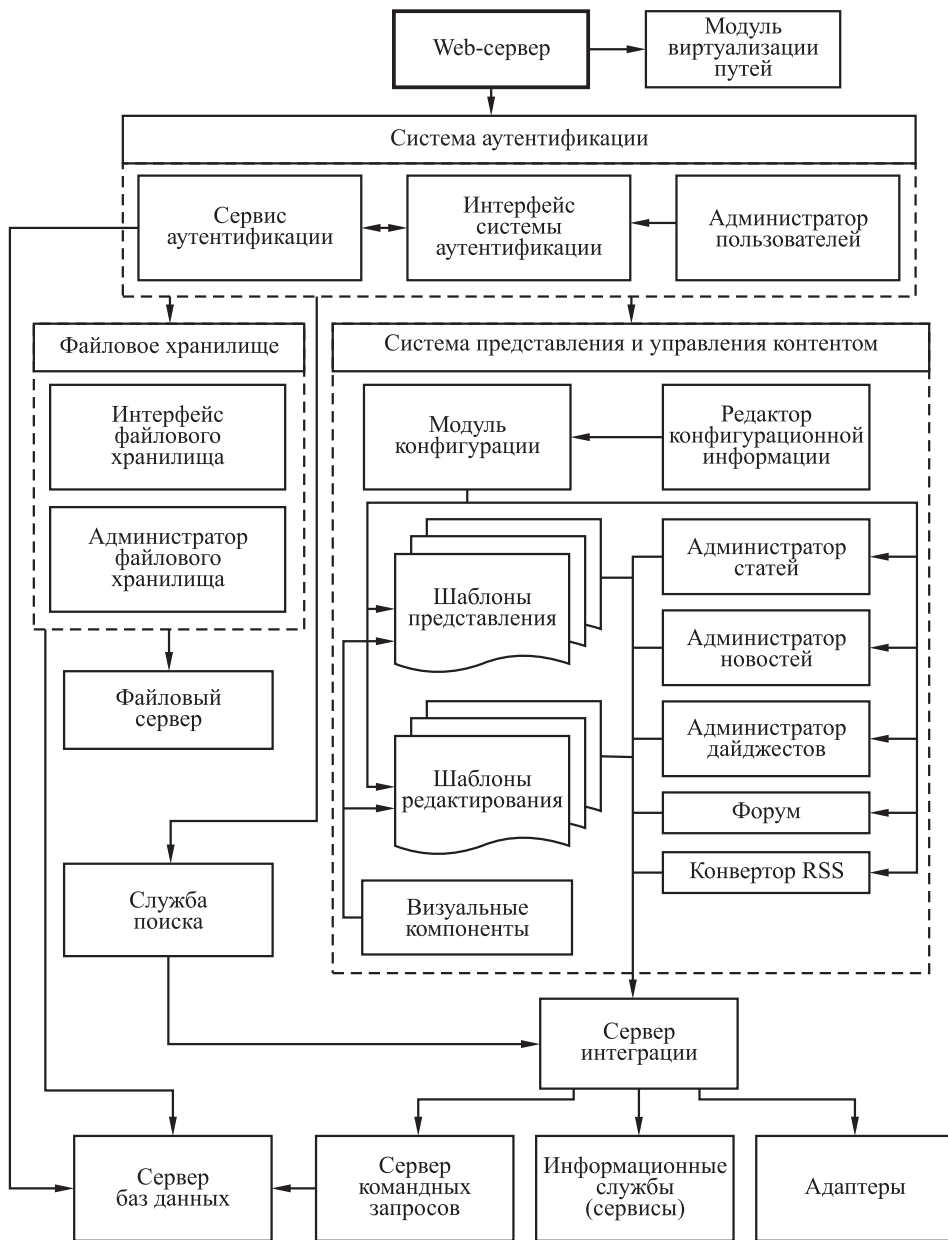


Рис. 2 Архитектура портала

вого хранилища являются приложениями ASP.NET, поэтому для обеспечения их работы на web-сервере установлена среда выполнения .NET Framework.

Кроме того, функциональность web-сервера расширена **модулем виртуализации путей**. Этот модуль необходим для преобразования виртуальных URI (Uniform Resource Identifier) страниц web-сервера в физические пути к шаблонам представления, которые фактически формируют HTML-представление запрошенных страниц. Данное преобразование обозначается термином “URL rewriting”. Преобразование путей позволяет делать пути страниц

более наглядными и запоминающимися, упрощает их ввод с клавиатуры, облегчает индексирование портала поисковыми системами. Преобразование путей осуществляется модулем виртуализации на основе конфигурационной информации, хранящейся в файле формата XML. Этот файл описывает соответствие URI и шаблонов представления. Модуль выполнен как ISAPI (Internet Server Application Program Interface) фильтр на языке C++.

Шаблоны представления предназначены для формирования HTML-представления требуемой страницы. Web-страница собирается из блоков

(заголовка, меню, блоков новостей и контента и т. п.). HTML-представление каждого такого блока формируется соответствующим визуальным компонентом. В шаблоне осуществляется конкатенация полученных фрагментов HTML-кода. Шаблон представления служит контейнером для набора визуальных и не визуальных компонентов интерфейса. Кроме того, шаблон содержит программный код, осуществляющий получение необходимых параметров компонентов от модуля работы с конфигурационной информацией. Каждый шаблон представления выполнен как обычная ASPX-страница.

Визуальные компоненты портала обеспечивают визуализацию блоков информации на web-странице. Компоненты осуществляют получение информационного содержания из различных источников (данных файла конфигурации, хранилища портала, внешних информационных источников), а затем формируют на его основе фрагмент HTML-кода, используемый затем при сборке страницы. Взаимодействие с этими источниками строится с помощью **сервера интеграции** [7]. Для каждой отображаемой страницы определен набор параметров, обеспечивающих получение необходимых данных от сервера интеграции. **Модуль работы с конфигурационной информацией** осуществляет определение этого набора параметров на основе адреса страницы, после чего сервер интеграции возвращает набор данных с помощью компонента “dataset”.

Для создания и модификации конфигурационной информации предназначен компонент **«Редактор конфигурационной информации»**. Этот компонент отвечает за создание и модификацию страниц сайта портала, формирование логической структуры страниц (меню) сайта, назначение шаблонов отображения страницам. Редактор отображает структуру сайта, описываемую конфигурационным файлом портала Content_Structure.xml в наглядной форме, и позволяет редактировать ее, выполняя необходимые изменения в конфигурационном файле. Редактор представляет собой ASPX-страницу, обеспечивающую выполнение следующих действий:

- создание / удаление / изменение раздела, подраздела;
- изменение позиции раздела в логической структуре отображения;
- добавление / удаление / изменение страницы раздела;
- изменение позиции страницы в логической структуре отображения;
- редактирование данных о разделах и страницах для выбранного языка (русский, английский) представления;

- вызов шаблона редактирования для страницы раздела;
- вызов редактора командного запроса;
- управление разграничением доступа к странице.

Информация о разделах и страницах, как и весь остальной контент сайта портала, может быть представлена на различных языках. Список поддерживаемых языков и зарегистрированных шаблонов не ограничен и хранится в файле конфигурации редактора, являющемся XML-документом.

С редактором конфигурационной информации связаны **шаблоны редактирования**. Они используются для наглядного визуального формирования необходимых наборов параметров для шаблонов представления. Например, шаблоны редактирования обеспечивают пользователю интерфейс для выбора статей, разделов новостей, режимов отображения визуальных компонентов и других параметров, используемых при настройке страниц. Каждому шаблону представления соответствует шаблон редактирования.

Сервис аутентификации отвечает за идентификацию пользователя, выполняющего текущий запрос к web-странице. Данный компонент выполняет проверку наличия у пользователя действительного билета безопасности [11]. Билет безопасности выдается пользователю при регистрации — на основании введенных им имени и пароля — и затем передается в каждом последующем запросе с помощью файлов “cookie”. В билете содержатся сведения о назначенных пользователю ролях и членстве в группах. Срок действия билета ограничен. На основе информации, получаемой от данного модуля, модуль конфигурации предоставляет или запрещает доступ пользователя к запрошенному ресурсу.

Регистрация новых пользователей и назначение им прав осуществляются компонентом **«Администратор пользователей»**. Этот компонент представляет собой интерфейс к базе данных, в которой хранятся учетные данные пользователей и информация о присвоенных им ролях и членстве в группах. Роль пользователя определяет его права на доступ к той или иной функциональности. Роли могут назначаться как путем прямого присвоения, так и путем включения пользователей в группы. С помощью компонента «Администратор пользователей» производится заведение новых пользователей, модификация их учетных данных, создание и модификация ролей и групп.

Для создания и модификации информации в собственном хранилище портала (там могут быть размещены такие типы контента, как статьи,

новости, документы) в хранилище портала используются компоненты «Администратор статей», «Администратор новостей» и «Администратор дайджестов». Все эти компоненты представляют собой интерфейсы к хранилищу портала и предназначены для создания и модификации соответствующих видов документов, организации этих документов в виде набора папок и управления правами доступа. Необходимость использования нескольких интерфейсов обусловлена разной организацией работы с новостями и статьями, соображениями удобства работы и разграничения доступа.

Новости, подготовленные с помощью компонента «Администратор новостей», могут быть экспортированы в формате RSS. Для этого в составе системы представления и управления содержанием предназначен компонент «Конвертер RSS».

В составе программной инфраструктуры имеется также компонент «Форум», служащий для построения системы обмена сообщениями по стандартной схеме форумов. Этот компонент обеспечивает управление структурой разделов форума, содержит пользовательские интерфейсы для просмотра тем и сообщений форума, создания новых тем и сообщений, администрирования.

Взаимодействие компонентов программной инфраструктуры с хранилищем портала, внешними информационными источниками и службами осуществляется через **сервер интеграции**. Он реализует промежуточный уровень взаимодействия с данными, обеспечивая единый метод работы с данными, находящимися в различных информационных источниках и службах, имеющих различную организацию, структуру данных (схему) и интерфейс доступа.

Хранилище данных портала построено на основе **сервера баз данных**, в качестве которого используется Microsoft SQL Server. Взаимодействие с сервером баз данных осуществляется посредством **сервера командных запросов** [7], который реализует промежуточный уровень взаимодействия с данными, находящимися в реляционной базе данных.

Компонент «**Интерфейс файлового хранилища**» предоставляет пользовательский интерфейс, обеспечивающий просмотр папок, поиск и загрузку файлов, помещенных в файловое хранилище. Метаинформация (размер, тип, описание, источник файла и пр.) размещается в базе данных. Для размещения новых файлов, задания их атрибутов и управления структурой папок используется компонент «**Администратор файлового хранилища**».

Служба поиска — один из важнейших компонентов портала, реализующий функции полнотекстового и атрибутного поиска информации [12]. Каждый информационный компонент или служ-

ба, будучи зарегистрированными в сервере интеграции, декларируют свою поисковую функциональность. Эта декларация включает перечень поисковых команд, список атрибутов, по которым возможен атрибутный поиск, и описание возвращаемых результатов поиска. Служба поиска, получая эти метаданные от сервера интеграции, обеспечивает интеграцию поисковых возможностей компонентов и служб в подсистему полнотекстового поиска. Эта подсистема имеет единый пользовательский интерфейс и доступна с любых страниц сайта портала через стандартный визуальный компонент полнотекстового поиска. Для атрибутного поиска служба, руководствуясь полученными метаданными, обеспечивает формирование поискового пользовательского интерфейса. Формирование интерфейса осуществляется путем добавления к стандартному поисковому шаблону необходимых пользовательских элементов управления в соответствии с названиями, типами и именами полей атрибутов, а также стандартного поля результатов поиска, представляющего собой таблицу, колонки которой соответствуют возвращаемым полям результата поиска.

Служба поиска также управляет асинхронной передачей запросов адаптерам, сбором, консолидацией и ранжированием результатов поиска и, наконец, предоставлением их пользователю.

5 Алгоритмы обработки пользовательского запроса

Каждому обращению пользовательского браузера к web-серверу портала с запросом на получение страницы соответствует определенная последовательность действий, выполняемая программной инфраструктурой портала для формирования запрашиваемой в web-запросе информации.

Сразу после приема HTTP-запроса web-сервером портала он передается на обработку модулю виртуализации путей, который преобразует URI запроса в физический путь к файлу. Преобразование осуществляется на основе данных конфигурации, результатом является физический путь к шаблону запрошенной страницы. После этого шаблон выполняется web-сервером, обрабатываясь в контексте порталного приложения ASP.NET. Прежде чем управление будет передано коду шаблона, оно передается модулям сервиса аутентификации и конфигурации.

Сервис аутентификации идентифицирует пользователя, в данный момент обращающегося к web-серверу, используя билет безопасности: выпол-

няется проверка наличия в запросе пользователя билета безопасности, проверка правильности этого билета, выдача билета безопасности при вводе пользователем имени и пароля на странице регистрации.

В модуле конфигурации определяется и сохраняется для дальнейшего использования набор параметров, которые должны быть переданы коду шаблона для обработки текущего запроса. Этот набор определяется в соответствии с полученным в запросе URL. Далее модуль конфигурации обрабатывает запрос авторизации ASP.NET приложения. К каждой web-странице доступ может быть открыт либо всем пользователям, либо только аутентифицированным пользователям, либо пользователям, владеющим определенными ролями. Если уровень полномочий пользователя недостаточен, доступ к странице блокируется. Администратор портала может управлять декларативной авторизацией на уровне страниц путем модификации соответствующих параметров конфигурации.

Следует отметить, что авторизация в портале реализована также и в ряде других подсистем, например администраторах статей и новостей, форуме, файловом хранилище. Обеспечение разграничения доступа к ресурсам в данном случае возлагается на конкретные подсистемы и информационные компоненты, централизованной же является только служба аутентификации. Подробнее организация и функционирование системы безопасности портала рассматриваются в [11].

После выполнения кода обработки событий в модулях авторизации и конфигурации управление передается непосредственно коду шаблона. Шаблон может содержать любой код, использующий любые услуги, предоставляемые .NET и ASP.NET (такие как работа с базами данных, файлами, вызов системных функций и т. п.). Однако типовой сценарий выполнения кода шаблона, отображающего некоторую информацию в соответствии с запросом пользователя, выглядит следующим образом:

- получение данных из различных источников (адаптеров) в соответствии с запросом пользователя (параметрами HTTP-запроса, значениями полей формы, текущим языком и т. п.);
- преобразование полученной информации в формат HTML.

Типовой сценарий выполнения кода шаблона, модифицирующего данные в соответствии с запросом пользователя, выглядит так:

- модификация информации в соответствующих источниках, при этом исходными данными обычно являются значения полей формы;

- формирование HTML-страницы с результатом операции или переадресация на другую страницу.

При решении задач получения и модификации данных в обоих типовых сценариях используется сервер интеграции, который принимает командный запрос, содержащий набор команд, получающих или модифицирующих необходимые данные, и набор параметров, необходимых для выполнения команд. Также серверу интеграции передается компонент “dataset” (набор данных). При выполнении сервером интеграции команды чтения этот компонент заполняется данными, полученными в результате запроса. При выполнении команды модификации данные, находящиеся в компоненте “dataset”, переносятся в соответствующий информационный компонент. Сервер интеграции, анализируя командный запрос, определяет необходимые для его выполнения адаптеры и направляет в них отдельные команды, используя информацию, предоставленную при регистрации информационного источника. Затем, в соответствии со схемой данных источника, сервер интеграции производит заполнение компонента “dataset”.

6 Структура программных модулей реализованного решения

Большинство компонентов текущей реализации информационного web-портала выполнены с использованием технологии Microsoft .NET в среде разработки Microsoft Visual Studio. Структура основных программных модулей показана на рис. 3.

Программную инфраструктуру портала образуют:

- программные компоненты, отвечающие за задачи аутентификации, проверки прав доступа, доступ к адаптерам портала, поддержание логической структуры отображения информации;
- инструментальные средства портала, обеспечивающие решение административных задач и задач редактирования данных;
- средства разработки, обеспечивающие создание новых компонентов и ресурсов, используемых в портале.

В качестве ключевых модулей, образующих основу инфраструктуры, можно выделить следующие:

- Interfaces — модуль, описывающий внутренние интерфейсы портала;

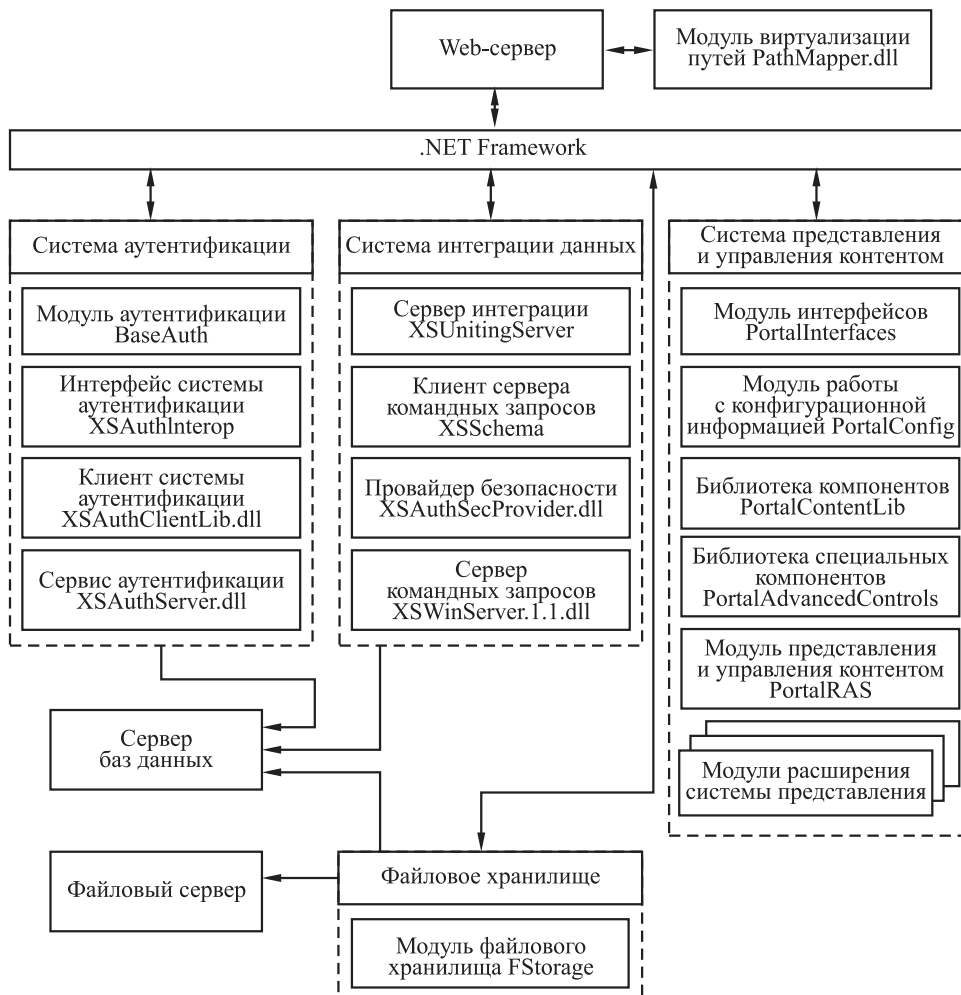


Рис. 3 Основные программные модули портала

- BaseAuth — модуль, отвечающий за проверку прав доступа к страницам;
- PortalConfig — модуль, обеспечивающий работу с файлом конфигурации портала, описывающим логическую структуру отображения;
- XSUnitingServer — модуль, обеспечивающий взаимодействие со службой командных запросов.

В модуле Interfaces описаны интерфейсы, обеспечивающие взаимодействие визуальных компонентов между собой и работу с логической структурой отображения портала, описанной в файле конфигурации.

Модуль BaseAuth предоставляет ряд функций, позволяющих определить: аутентифицирован ли пользователь, инициировавший HTTP(HTTPS)-запрос, каковы его полномочия, проверить наличие у него необходимых полномочий и в случае их от-

сутствия запретить доступ к странице и потребовать авторизации.

Для работы с логической структурой отображения портала и определения необходимых атрибутов страниц (таких как текст командного запроса, название пункта меню и т.д.) по их URL предназначен модуль PortalConfig. Модуль позволяет избежать прямой работы с данными файла конфигурации и предоставляет ряд функций для поиска и навигации в структуре страниц. Кроме того, модуль обеспечивает хранение различных настроек пользовательского интерфейса, например текущего языка и параметров персонализации. Хранение настроек в течение сеанса работы пользователя реализовано с помощью механизма “cookie”.

Модуль XSUnitingServer представляет собой интерфейс сервера интеграции. С помощью этого модуля шаблоны и службы портала могут выполнить командные запросы и использовать сервисные

функции для подстановки параметров запросов (в том числе встроенных, например текущего языка интерфейса).

Набор визуальных компонентов, обеспечивающих отображение информации и элементов пользовательского интерфейса, содержится в библиотеках PortalContentLib и PortalAdvancedControls. Следует отметить, что эти модули включают только специфичные для портала компоненты: различные меню, компонент переключения языков интерфейса, стандартные заголовки и подвалы страниц. Для решения большинства других задач достаточно использования стандартных компонентов, имеющихся в среде разработки Microsoft Visual Studio .NET. Набор стандартных компонентов достаточно велик и включает такие элементы, как текстовые метки, поля ввода, списки, поля со списками, флажки, таблицы, изображения, кнопки и др. Визуальные компоненты могут быть выполнены и в виде отдельных программных файлов, подключаемых на этапе дизайна страницы.

Параметры отображения любого компонента могут настраиваться на этапе дизайна (с помощью свойств) и в процессе выполнения страницы (в программном коде шаблона). Если для дизайна шаблона не используется среда Visual Studio .NET, параметры отображения могут быть указаны непосредственно в коде ASPX-страницы, так как каждый используемый в шаблоне компонент описывается с помощью расширенных тэгов языка HTML. Компоненты поддерживают использование CSS классов, поэтому возможно управление дизайном страниц и традиционным способом — через таблицы стилей.

Для использования программных компонентов в стандартных шаблонах портала необходимо, чтобы компоненты были разработаны в среде Microsoft Visual Studio .NET с использованием одного из поддерживаемых платформой .NET языков (C#, VB, J# или C++). Сами шаблоны страниц в портале также построены на базе ASPX-страниц. Это не является обязательным требованием, однако при использовании других технологий удобство использования программной инфраструктуры портала будет снижено.

В общем случае ASPX-страница шаблона содержит:

- элементы оформления, созданные с помощью HTML и CSS;
- набор визуальных компонентов;
- компонент “dataset”, связанный со всеми компонентами, использующими порталную технологию связывания данных;

– программный код, обеспечивающий логику работы шаблона.

Наряду с HTML-представлением, хранящимся в виде файла с расширением ASPX, шаблон содержит программный код, хранящийся в виде файла с расширением CS, ссылка на который указывается в соответствующем ASPX-файле. Программный код шаблона получает управление при поступлении очередного web-запроса, в случае если содержимое запрошенной страницы не было сгенерировано ранее и помещено в кэш среды выполнения .NET (.NET framework).

Шаблоны редактирования устроены аналогично шаблонам представления. Отличия заключаются только в использовании визуальных компонентов, обеспечивающих не только отображение, но и модификацию информации, и наличии программного кода, выполняющего формирование корректного командного запроса, сохраняемого в файле конфигурации, и помещенные модифицированной информации в соответствующее хранилище.

Поскольку шаблоны редактирования вызываются по фиксированным URL, то для определения текущей редактируемой страницы им передается параметр, содержащий URL страницы в логической структуре отображения. С помощью модуля PortalConfig в коде шаблона можно получить значения всех необходимых параметров для редактируемой страницы.

Как уже отмечалось выше, шаблоны редактирования — не единственный инструмент редактирования содержания. Каждая служба (прикладная система) может иметь собственный пользовательский интерфейс для управления хранилищем информации. В этом случае пользовательский интерфейс для управления хранилищем представляет собой одну или несколько независимых ASPX-страниц, код которых обеспечивает выполнение всех необходимых действий по управлению содержанием хранилища информации. Эти страницы могут не регистрироваться в файле конфигурации, однако при этом проверка прав доступа должна выполняться непосредственно в коде страниц с помощью функций модуля BaseAuth. Тем не менее им в полной мере доступны все службы и функции программной инфраструктуры портала.

7 Заключение

Информационный web-портал, представленный в данной статье, является результатом совместного труда коллектива авторов и выполнен, в том числе, и в интересах РАН. Описанное решение на данный момент внедрено, имеет статус основного

источника информации о РАН в сети Интернет и доступно по адресу www.ras.ru. Реализация данного проекта замечена и привлекает внимание не только использующих его результаты академических организаций, но и производителей аналогичного программного обеспечения [13, 14].

Основными особенностями архитектуры и практической реализации программного решения, описанного в данной статье, являются:

- (1) использование современных методов построения крупных web-систем, таких как многозвенная архитектура, виртуализация путей, разделение оформления и содержания, поддержка работы как со структурированными, так и неструктурированными данными, наличие web-интерфейса администрирования, предоставление данных как для просмотра пользователями, так и для обработки web-системами;
- (2) соответствие современным требованиям в части представления данных, безопасности, принципа единой регистрации;
- (3) применение современных технологий, таких как Microsoft .NET, web-сервисы, и стандартов (SQL, XML, SOAP, WSDL, RSS);
- (4) полная независимость и самостоятельность решения;
- (5) использование компонентного подхода как при отображении информации, так и при работе с информационными источниками;
- (6) механизм унификации работы с разнородными информационными источниками на основе технологии командных запросов;
- (7) наличие методологии и развитого инструментария, позволяющих расширять возможности как системы представления портала, так и средств интеграции.

Литература

1. Коули С. Конец рынка порталов // Computerworld, 2005. № 32. http://www.osp.ru/cw/2005/32/036_1.htm.
2. Порталы сегодня // Computerworld, 2004. № 36. http://www.osp.ru/cw/2004/36/000_39.htm.
3. Соколов И. А., Босов А. В., Бездушный А. Н. О Информационном Web-портале Российской академии наук // Системы и средства информатики, 2003. Вып. 13. С. 119–138.
4. Босов А. В., Серебряков В. А. Информационный веб-портал Российской академии наук // Материалы конференции «Государство в XXI веке», Москва, 10 апреля 2003 г. <http://www.microsoft.com/rus/events/gov2003/schedule.asp>.
5. Босов А. В., Иванов А. В. О реализации системы управления содержанием информационного Web-портала // Информационные технологии и вычислительные системы, 2004. № 4. С. 85–103.
6. Босов А. В., Чавтараев Р. Б. Управление информационными компонентами Web-портала РАН // Системы и средства информатики, 2003. Вып. 13. С. 156–171.
7. Босов А. В., Полухин А. Н. Технология доступа и интеграции данных в информационном web-портале // Системы и средства информатики, 2006. Вып. 16. С. 355–373.
8. Bezdashnyi A. N., Zhizhchenko A. B., Kulagin M. V., Serebryakov V. A. Integrated information resource system of the Russian Academy of Sciences and a technology for developing digital libraries // Programming and Computer Software, 2000. Vol. 26. No. 4. P. 177–185.
9. Рухтер Дж. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework. Мастер класс / Пер. с англ. 3-е изд. — М.: Издательско-торговый дом «Русская редакция»; СПб.: Питер, 2005.
10. Howard M., LeBlank D. Writing secure code. 2nd ed. Microsoft Press, 2003.
11. Босов А. В., Полухин А. Н. О реализации сервиса аутентификации web-портала // Информационные технологии и вычислительные системы, 2005. № 3. С. 50–60.
12. Босов А. В., Чавтараев Р. Б. Организация поиска в Информационном web-портале // Системы и средства информатики. Специальный выпуск «Научно-методологические проблемы информатики», 2006. С. 438–460.
13. Россия. Веб-портал РАН обеспечивает эффективный доступ научного сообщества к актуальной информации // Информационный бюллетень Microsoft, 2004. Вып. 26. Ноябрь.
14. Российская академия наук реализует систему управления содержанием своего информационного веб-портала на основе платформы Microsoft .Net. Примеры внедрения. <http://www.microsoft.com/Rus/Casestudies/CaseStudy.aspx?id=318>.

БАЙЕСОВСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ В СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ С МАРКОВСКИМИ СКАЧКООБРАЗНЫМИ ПРОЦЕССАМИ: ИГРОВОЙ ПОДХОД*

А. В. Борисов¹

Аннотация: В статье рассматривается задача совместного оценивания состояния и параметров в системах наблюдения с марковскими скачкообразными процессами с конечным числом состояний по имеющимся непрерывным и считающим наблюдениям. Уравнения динамики и наблюдений зависят от случайного конечномерного параметра, имеющего неизвестное распределение с заданным носителем. В качестве критериев качества выступают условные математические ожидания некоторых квадратичных функций оценок. Доказано утверждение о существовании седловой точки в поставленной минимаксной задаче. Получена характеристика наихудшего распределения и минимаксной оценки как решения более простой двойственной задачи. Практическая применимость представленных результатов проиллюстрирована на примере решения задачи оперативного оценивания состояния ТСП-соединения, функционирующего в условиях неопределенности.

Ключевые слова: фильтр Вонэма; минимаксное оценивание; обобщенный квадратичный критерий; уравнение Закаи

1 Введение

Фильтр Калмана–Бьюси [1] и фильтр Вонэма [2] являются самыми известными и широко применяемыми на практике СК-оптимальными конечномерными оценками фильтрации состояний стохастических дифференциальных систем. Известно, что в большом числе прикладных задач оценивания имеет место априорная неопределенность параметров системы наблюдения, что породило не только множество модификаций указанных алгоритмов фильтрации, но и привело к возникновению целого спектра направлений теории оценивания в стохастических системах, и, в частности, минимаксного подхода. При этом большее внимание было уделено фильтру Калмана–Бьюси, и основные результаты опираются на наличие у рассматриваемой задачи оценивания в той или иной мере следующих ключевых свойств: «линейная система наблюдения – гауссовость – допустимость линейных оценок». Возможность гауссовских шумов в линейной системе наблюдения обеспечивала оптимальность линейных оценок. В случае же отсутствия гауссовости чаще всего класс допустимых оценок принудительно ограничивался классом линейных оценок. Не ставя целью написание всеобъемлющего обзора по фильтрации Калмана–Бьюси в минимаксной постановке, отметим лишь ряд работ,

постановка задач и результаты которых близки к данной статье.

В [3] исследовалась задача минимаксной фильтрации в линейных системах наблюдения по безусловным квадратичному и обобщенному квадратичному критериям. При этом параметрическая неопределенность присутствовала как в интенсивностях шумов, так и в матрицах динамики и плана системы наблюдения. Решение соответствующей игровой задачи было найдено в классе смешанных стратегий, так как в чистых стратегиях оно в общем случае не существует. Это означает, что совокупности неопределенных параметров была навязана случайная природа и седловая точка критерия определялась парой «наихудшее распределение – наилучший оценитель для наихудшего распределения». При этом наилучшая оценка являлась взвешенным значением некоторого набора оценок фильтрации Калмана. В [4] данные результаты были обобщены и на случай непараметрической неопределенности распределений шумов в системе наблюдения.

В работе [5] в линейной гауссовской системе наблюдения присутствовала параметрическая неопределенность шумов в уравнениях состояния и наблюдения, а в качестве критерия оптимальности выступал условный СК-критерий. Вид критерия,

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-01-00508-а) и программы ОИТВС РАН «Фундаментальные алгоритмы информационных технологий» (проект 1.5).

¹ Институт проблем информатики Российской академии наук, A.Borisov@ipiran.ru

наличие свойств линейности и гауссовости самой системы наблюдения, а также отсутствие неопределенности в матрицах динамики и плана системы наблюдения — предпосылки того, что игровая задача имеет решение в чистых стратегиях, а наилучшей оценкой является линейная оценка фильтрации Калмана, построенная для наихудших параметров шумов.

В упомянутых выше работах по минимаксному оцениванию рассматривались системы наблюдения с дискретным временем. В [6, 7] исследовались задачи фильтрации состояния стохастических дифференциальных систем наблюдения с неопределенностями в интенсивностях шумов, а в качестве критериев оптимальности выступали, соответственно, безусловные интегральный и мгновенный СК-критерии. Линейность оптимальных фильтров в данном случае была обусловлена допустимостью гауссовского распределения шумов в системе.

Задача фильтрации Вонэма, заключающаяся в СК-оптимальном оценивании состояния марковского скачкообразного процесса с конечным числом состояний (МСПКЧС) по косвенным непрерывным и считающим наблюдениям, обладает рядом ключевых отличий от задачи фильтрации Калмана, затрудняющих решение соответствующей минимаксной задачи. Во-первых, несмотря на то что исследуемая система наблюдения формально допускает запись в виде линейной дифференциальной стохастической системы [8], она не является гауссовской из-за негауссовости мартингала в представлении оцениваемого марковского процесса. Во-вторых, характеристика данного мартингала связана с матрицей интенсивностей переходов марковского процесса. При наличии неопределенности этой матрицы данное свойство автоматически ведет к неопределенности характеристики мартингала. В-третьих, оценки фильтрации Вонэма являются принципиально нелинейными и представляют собой условное распределение оцениваемого процесса относительно имеющихся наблюдений. Для исследуемой системы наблюдения можно, конечно, решать задачу минимаксной линейной фильтрации. Однако полученные оценки уже не будут обладать свойством вероятностного распределения: условие нормировки сохранится, в то время как неотрицательность не будет иметь места.

Целью данной работы является корректная постановка и решение задачи совместного минимаксного оценивания марковских процессов с конечным числом состояний и идентификации неопределенного параметра системы наблюдения, присутствующего как в уравнении динамики, так и в наблюдениях.

Статья построена следующим образом. Раздел 2 содержит описание исследуемой системы наблюдения. Ее ключевой особенностью является то, что тройка «матрица интенсивностей переходов — матрица плана — интенсивность считающих наблюдений» является функцией ненаблюдаемого случайного параметра, имеющего известное распределение. Приведено решение задачи совместного байесовского оценивания состояния процесса и указанного параметра, являющееся основой для решения задач минимаксного оценивания.

Раздел 3 посвящен детальной постановке задачи минимаксного оценивания. Ранее подобная постановка с точки зрения вида показателя качества и класса допустимых оценок встречалась в работах автора [9, 10] и имеет ряд особенностей по сравнению с традиционными задачами минимаксного оценивания. Во-первых, в качестве критериев выступают *условные* математические ожидания некоторых квадратичных функций оценок относительно имеющихся наблюдений. Во-вторых, допустимые оценки могут быть *нелинейными*. В-третьих, класс неопределенности включает в себя все распределения параметра, сосредоточенные на известном подмножестве конечномерного евклидова пространства. Приведены доводы в пользу практической применимости поставленных задач оценивания.

Раздел 4 содержит решение поставленной задачи оценивания. В нем приведена теорема о существовании седловой точки соответствующей минимаксной оптимизационной задачи, даны формулы, определяющие оптимальную оценку, а также указаны некоторые свойства наихудших распределений.

В разделе 5 приводится содержательный прикладной пример, иллюстрирующий практическую применимость предлагаемых минимаксных оценок. Рассмотрена задача мониторинга состояния ТСП-соединения, функционирующего в соответствии с классической моделью Джилберта [11], в условиях априорной неопределенности характеристик канала.

В заключительном разделе 6 обсуждаются полученные результаты, а также приводятся возможные направления дальнейших исследований в данной области.

2 Байесовское оценивание в системах наблюдения с марковскими скачкообразными процессами

На конечном отрезке времени $[0, T]$ рассматривается система наблюдения

$$\left. \begin{aligned} \theta_t &= \theta_0 + \int_0^t \Lambda^* \theta_{s-} ds + M_t^\theta; \\ Q_t &= \int_0^t \mu \theta_{s-} ds + M_t^Q; \\ U_t &= \int_0^t A \theta_{s-} ds + \varepsilon W_t. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $\theta_t \in S_n$ — ненаблюдаемый однородный МСПКЧС с множеством состояний; $S_n = \{e_1, \dots, e_n\}$ (e_k обозначает k -й единичный вектор в евклидовом пространстве \mathbb{R}^n), с известным начальным распределением p_0 и матрицей переходных вероятностей $\Lambda \in \mathbb{R}^{n \times n}$; $Q_t \in \mathbb{Z}_+$ — считающий процесс наблюдений, интенсивность которого $\mu\theta$ зависит от состояния θ ($\mu \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ представляет собой вектор-строку возможных интенсивностей); $U_t \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ — процесс непрерывных наблюдений ($A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ является матрицей плана наблюдений); $W_t \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ — винеровский процесс, представляющий ошибки непрерывных наблюдений; $\varepsilon \varepsilon^* > 0$ — невырожденная интенсивность ошибок непрерывных наблюдений.

Первые два уравнения в (1) являются мартингалным разложением для θ и Q [8]: процессы M_t^θ и M_t^Q являются $\mathcal{F}_t^{\theta, Q}$ -согласованными центрированными квадратично-интегрируемыми мартингалами с квадратическими характеристиками

$$\begin{aligned} \langle M^\theta, M^\theta \rangle_t &= \int_0^t (\text{diag}(\Lambda^* \theta_{s-}) - \Lambda^* \text{diag}(\theta_{s-}) - \\ &\quad - \text{diag}(\theta_{s-}) \Lambda) ds, \\ \langle M^Q, M^Q \rangle_t &= \int_0^t \mu \theta_{s-} ds. \end{aligned}$$

В дальнейшем в работе предполагается, что матрица интенсивностей переходов $\Lambda = \Lambda(\gamma(\omega))$, матрица плана непрерывных наблюдений $A = A(\gamma(\omega))$ и вектор интенсивностей считающих наблюдений $\mu = \mu(\gamma(\omega))$ являются известными функциями ненаблюдаемого случайного векторного параметра $\gamma(\omega) \in \mathbb{R}^{k \times 1}$.

Для описания вероятностного пространства с фильтрацией используются следующие обозначения:

$$\mathcal{F}_t \stackrel{\text{def}}{=} \sigma\{\gamma(\omega), \theta_s(\omega), Q_s(\omega), W_s(\omega), 0 \leq s \leq t\} — \text{«универсальный» естественный поток } \sigma\text{-подалгебр, порожденный } \theta, Q, W \text{ и } \gamma;$$

$$\mathcal{F}_t \stackrel{\text{def}}{=} \bigvee_{t \in [0, T]} \mathcal{F}_t;$$

$$\mathcal{O}_t \stackrel{\text{def}}{=} \sigma\{Q_s(\omega), U_s(\omega), 0 \leq s \leq t\} — \text{естественный поток } \sigma\text{-подалгебр, порожденный наблюдениями } Q \text{ и } U.$$

Предполагается, что вероятностная мера \mathbf{P}_F , определенная на измеримом пространстве (Ω, \mathcal{F}) , известна и удовлетворяет следующим условиям:

- I $\mathbf{P}_F\{\omega : \gamma(\omega) \in \mathcal{L}\} = F(\mathcal{L})$, где $F(\cdot)$ — известное априорное распределение параметра γ , причем существует и известно множество $\mathcal{C} \subseteq \mathbb{R}^{k \times 1}$ такое, что $\gamma(\omega) \in \mathcal{C} \subseteq \mathbb{R}^{k \times 1}$ для любого $\omega \in \Omega$;
- II $A = A(q) : \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}^{m \times m}$, $\Lambda = \Lambda(q) : \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ и $\mu = \mu(q) : \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}^{1 \times n}$ — известные ограниченные функции; при этом $\Lambda(q)$ и $\mu(q)$ удовлетворяют обычным условиям интенсивностей: $\lambda_{ij}(q) \geq 0$, если $i \neq j$, $\sum_{j=1}^n \lambda_{ij}(q) \equiv 0$ и $\mu_i(q) \geq 0$ для $i = 1, 2, \dots, n$;
- III Начальное условие $\theta_0(\omega)$, случайный вектор $\gamma(\omega)$ и шум $W_t(\omega)$ в наблюдениях независимы в совокупности;
- IV $M^Q \perp\!\!\!\perp M^\theta$ [12], т.е. $M_0^\theta M_0^Q = 0$ почти наверное (п.н.), и для любого марковского относительно $\{\mathcal{F}_t\}$ момента τ выполняется равенство $\mathbf{E}_F \{M_\tau^\theta M_\tau^Q\} = 0$;

V Верно равенство

$$\mathbf{E}_F \left\{ \exp \left[\int_0^t A^*(\gamma)(\varepsilon \varepsilon^*)^{-1} dU_s + \frac{1}{2} \int_0^t A^*(\gamma)(\varepsilon \varepsilon^*)^{-1} A(\gamma) ds + \int_0^t \ln(\mu(\gamma)\theta_{s-}) dQ_s - \int_0^t (\mu(\gamma)\theta_{s-} - 1) ds \right] \right\} = 1.$$

Индекс F в обозначениях \mathbf{P}_F и \mathbf{E}_F используется для указания зависимости вероятностной меры и соответствующего математического ожидания от априорного распределения F параметра $\gamma(\omega)$.

Задача байесовского оценивания вектора $z_t \stackrel{\text{def}}{=} \text{col}(\theta_t, \gamma)$ заключается в нахождении $\hat{z}_t^F \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{E}_F \{z_t | \mathcal{O}_t\}$.

Как известно, оценка \hat{z}_t^F является оптимальной как в смысле *безусловного СК-критерия*

$$\hat{z}_t^F \in \text{Arg} \min_{\bar{z}_t \in \mathcal{M}_t} \mathbf{E}_F \{ \|z_t - \bar{z}_t\|^2 \},$$

так и его *условной версии*

$$\hat{z}_t^F \in \text{Arg} \min_{\bar{z}_t \in \mathcal{M}_t} \mathbf{E}_F \{ \|z_t - \bar{z}_t\|^2 | \mathcal{O}_t \}. \quad (2)$$

При этом множество допустимых оценок \mathcal{M}_t вектора \bar{z}_t включает в себя все \mathcal{O}_t -измеримые функции, а оптимальность \hat{z}_t^F в смысле условного критерия (2) означает, что неравенство

$$\mathbf{E}_F \{ \|z_t - \hat{z}_t^F\|^2 | \mathcal{O}_t \} \leq \mathbf{E}_F \{ \|z_t - \bar{z}_t\|^2 | \mathcal{O}_t \}$$

выполняется \mathbf{P}_F -п.н. для любой другой оценки $\bar{z}_t \in \mathcal{M}_t$.

Сформулированная выше проблема оценивания может быть очевидным образом трансформирована в задачу оптимальной нелинейной фильтрации. Мартингалные представления процессов θ и Q остаются справедливыми при замене неслучайных матрицы Λ и вектора μ их случайными аналогами $\Lambda(\omega)$ и $\mu(\omega)$, и формулы для квадратических характеристик $\langle M^\theta, M^\theta \rangle_t$ и $\langle M^N, M^N \rangle_t$ также формально не изменяются.

Рассмотрим новую систему наблюдения относительного расширенного вектора состояния $z_t \stackrel{\text{def}}{=} \text{col}(\theta_t, \gamma_t)$

$$\left. \begin{aligned} \theta_t &= \theta_0 + \int_0^t \Lambda^*(\gamma_{s-}) \theta_{s-} ds + M_t^\theta; \\ \gamma_t &= \gamma; \\ Q_t &= \int_0^t \mu(\gamma_{s-}) \theta_{s-} ds + M_t^N; \\ U_t &= \int_0^t A(\gamma_{s-}) \theta_{s-} ds + \varepsilon W_t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

и определим условные вероятности

$$\begin{aligned} \hat{P}_i^F(\mathcal{L}, t) &\stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{P}_F \{ \gamma_t \in \mathcal{L}, \theta_t = e_i | \mathcal{U}_t \}, \quad i = \overline{1, n}, \\ \hat{P}^F(\mathcal{L}, t) &\stackrel{\text{def}}{=} \text{col}(\hat{P}_1^F(\mathcal{L}, t), \dots, \hat{P}_n^F(\mathcal{L}, t)). \end{aligned}$$

Предложение 1. Если условия I–V выполнены для системы наблюдения (3), то условное распределение $\hat{P}^F(\mathcal{L}, t)$ определяется следующим образом:

$$\hat{P}^F(\mathcal{L}, t) = K \int_{\mathcal{L}} \tilde{\theta}_t(q) F(dq).$$

Здесь

$$K = \left(\int_{\mathcal{C}} \mathbf{1}_{\tilde{\theta}_t}(q) F(dq) \right)^{-1},$$

$\tilde{\theta}_t(q)$ — ненормированное условное распределение θ_t по наблюдениям \mathcal{O}_t , вычисленное с помощью алгоритма фильтрации Вонэма в предположении, что $\gamma(\omega) = q$:

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_t(q) &= p_0 + \int_0^t \Lambda^*(q) \tilde{\theta}_{s-}(q) ds + \\ &+ \int_0^t \text{diag}(\tilde{\theta}_{s-}(q)) A^*(q) (\varepsilon \varepsilon^*)^{-1} dU_s + \\ &+ \int_0^t [\text{diag} \mu(q) - I_{n \times n}] \tilde{\theta}_{s-}(q) (dQ_s - ds), \quad (4) \end{aligned}$$

где $I_{n \times n}$ — единичная матрица размера $n \times n$, а $\mathbf{1}$ — вектор-строка соответствующей размерности, составленная из единиц.

Байесовская оценка \hat{z}_t^F вектора z_t определяется формулами:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t^F &= K \int_{\mathcal{C}} \tilde{\theta}_t(q) F(dq), \\ \hat{\gamma}_t^F &= K \int_{\mathcal{C}} q \mathbf{1}_{\tilde{\theta}_t}(q) F(dq). \end{aligned}$$

Доказательство предложения 1 аналогично приведенному в [10] для случая непрерывных наблюдений.

Представленное решение задачи байесовского оценивания является основой для решения соответствующей задачи в условиях неопределенности, о которой пойдет речь в следующем разделе.

3 Постановка задачи минимаксного оценивания

Рассмотрим систему наблюдения (3), для которой выполнены условия II–V, а условие I заменено на I':

I' Распределение $F(\mathcal{L}) = \mathbf{P}_F \{ \omega \in \Omega : \gamma(\omega) \in \mathcal{L} \}$ априори не известно; при этом $\gamma(\omega) \in \mathcal{C} \subseteq \mathbb{R}^{k \times 1}$ для любого $\omega \in \Omega$ и \mathcal{C} — известный выпуклый компакт.

В качестве множества неопределенности \mathbb{F} выступает набор всех распределений F параметра $\gamma(\omega)$, удовлетворяющих указанным свойствам. В отличие от постановки задачи байесовского оценивания вектора z_t , рассмотренной в предыдущем разделе, из-за данной неопределенности имеется не одно, а целое семейство вероятностных пространств с фильтрацией $\mathcal{P}_{\mathbb{F}} = \{ (\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P}_F, \{ \mathcal{F}_t \}_{t \in [0, T]}) \}_{F \in \mathbb{F}}$, параметризованное распределением $F \in \mathbb{F}$.

Пусть $g_t \stackrel{\text{def}}{=} g(z_t)$ — сигнальный процесс, подлежащий оцениванию. Данный процесс является известной функцией обобщенного состояния системы (3): $g(z) : S_n \times \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}^{l \times 1}$, причем

$$\sup_{F \in \mathbb{F}} \mathbf{E}_F \{ \|g_t\|^2 \} < \infty .$$

Для дальнейшей корректной постановки задачи минимаксного оценивания необходимо однозначным образом выбрать версию условного математического ожидания, для чего дополнительно потребуются следующие обозначения:

$\mathbf{C}^m[0, t]$ — пространство непрерывных функций $f : [0, t] \rightarrow \mathbb{R}^{m \times 1}$;

$\mathbf{B}[0, t]$ — множество кусочно-постоянных неубывающих функций, начинающихся из 0, со скачками, равными +1, причем число скачков на конечных интервалах конечно;

\mathcal{B}_t — σ -алгебра цилиндрических множеств на $\mathbf{C}^m[0, t] \times \mathbf{B}[0, t]$, пополненная множествами \mathbf{P}_F -меры нуль для всех $F \in \mathbb{F}$;

$\mathbf{W}^m[0, t]$ — подмножество пространства $\mathbf{C}^m[0, t]$ функций φ , равномерно непрерывных по Гёльдеру с любым показателем $\alpha \in (0, \frac{1}{2})$, т. е. функций, для которых неравенство

$$\sup_{0 \leq s_1 < s_2 \leq t} \|\varphi(s_2) - \varphi(s_1)\|^\alpha < K_\varphi |s_2 - s_1|^\alpha \quad (5)$$

выполняется для некоторой конечной константы $K_\varphi = K(\varphi)$ и любого $\alpha \in (0, \frac{1}{2})$;

$O^t \stackrel{\text{def}}{=} (U^t, Q^t)$ — траектории непрерывных и считающих наблюдений, полученные на отрезке времени $[0, t]$.

Согласно [13] в стохастическом базисе с фильтрацией $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P}_F, \{\mathcal{F}_t\}_{t \in [0, T]})$ (т. е. при фиксированном распределении $F \in \mathbb{F}$) условное математическое ожидание \mathcal{F}_t -измеримой интегрируемой случайной величины $\eta(\omega)$ определяется только \mathbf{P}_F -п.н.:

$$\hat{\eta}^F \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{E}_F \{ \eta(\omega) | \mathcal{O}_t \} = \eta^F(O^t) \quad \mathbf{P}_F\text{-п.н.}$$

для некоторой \mathcal{B}_t -измеримой функции $\hat{\eta}^F(\cdot) : \mathbf{C}^m[0, t] \times \mathbf{B}[0, t] \rightarrow \mathbb{R}$. Это означает, что для любого $F \in \mathbb{F}$ существует подмножество \mathbf{P}_F -меры нуль, на котором условное ожидание может определяться произвольным образом. Если игнорировать указанную неоднозначность, то можно прийти к тому, что для любой траектории наблюдений $O^t \in \mathbf{C}^m[0, t] \times \mathbf{B}[0, t]$ найдется такое распределение $F \in \mathbb{F}$, что $\mathbf{E}_F \{ \eta(\omega) | \mathcal{O}_t \}$ на данной траектории определяется неоднозначно, что делает последующую задачу оптимизации некорректной. Чтобы избежать такой ситуации, необходимо единым образом выбрать версию условного математического ожидания для всех возможных мер \mathbf{P}_F .

Выберем подмножество $\mathcal{X}[0, t] \subseteq \mathbf{C}^m[0, t] \times \mathbf{B}[0, t]$ пространства допустимых траекторий наблюдений O^t такое, что $\mathbf{P}_F \{ O^t \in \mathcal{X}[0, t] \} \equiv 1$ для любого $F \in \mathbb{F}$.

Зафиксируем некоторое распределение $F \in \mathbb{F}$ и рассмотрим соответствующее вероятностное пространство с фильтрацией $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P}_F, \{\mathcal{F}_t\}_{t \in [0, T]})$. Введем процесс

$$\begin{aligned} \Phi_t = \exp & \left[\int_0^t A^*(\gamma)(\varepsilon\varepsilon^*)^{-1} dU_s + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \int_0^t A^*(\gamma)(\varepsilon\varepsilon^*)^{-1} A(\gamma) ds + \int_0^t \ln(\mu(\gamma)\theta_{s-}) dQ_s - \right. \\ & \left. - \int_0^t (\mu(\gamma)\theta_{s-} - 1) ds \right] \end{aligned}$$

и новую вероятностную меру $\tilde{\mathbf{P}}_F$ такую, что

$$\frac{d\tilde{\mathbf{P}}_F}{d\mathbf{P}_F} = (\Phi_T)^{-1} .$$

По теореме Гирсанова [14, 15] $\bar{U}_t \stackrel{\text{def}}{=} (\varepsilon\varepsilon^*)^{-1/2} U_t$ является \mathcal{O}_t -согласованным стандартным винеровским процессом в $(\Omega, \mathcal{F}, \tilde{\mathbf{P}}_F, \{\mathcal{O}_t\}_{t \in [0, T]})$, а Q_t — \mathcal{O}_t -согласованным стандартным пуассоновским. Помимо этого известно (см., например, [16]), что почти все траектории винеровского процесса являются непрерывными по Гёльдеру с показателем $\alpha \in (0, \frac{1}{2})$, т. е. удовлетворяют условию (5), а траектории стандартного пуассоновского процесса, рассмотренные на отрезке $[0, t]$, почти наверное принадлежат множеству $\mathbf{B}[0, t]$. При этом существенным является то, что процесс Φ_t , определяющий производную Радона–Никодима $d\tilde{\mathbf{P}}_F/d\mathbf{P}_F$, не зависит от конкретного вида распределения $F \in \mathbb{F}$ и $\tilde{\mathbf{P}}_F \sim \mathbf{P}_F$ для любого $F \in \mathbb{F}$. Из всех этих фактов следует, что можно выбрать $\mathcal{X}[0, t] = \mathbf{W}^m[0, t] \times \mathbf{B}[0, t]$.

Определив таким образом множество «хороших» траекторий наблюдения, необходимо исключить неоднозначность определения условного математического ожидания в случае «аномальных» наблюдений, выбрав одну его версию, общую для всех распределений $F \in \mathbb{F}$ (и для всех функций, для которых это математическое ожидание существует), следующим образом: $\mathbf{E}_F \{ \eta(\omega) | \mathcal{O}_t \} \equiv 0$ для любых $F \in \mathbb{F}$, если $\omega \in \Omega : O^t(\omega) \notin \mathcal{X}[0, t]$. В дальнейшем изложении, когда речь пойдет об условном математическом ожидании относительно имеющихся наблюдений, всегда будет выбираться именно эта его версия.

В качестве множества допустимых оценителей \mathbb{G}_t выбираются все \mathcal{B}_t -измеримые функции $\bar{g}_t = \bar{g}_t(u, v) : \mathbf{C}^m[0, t] \times \mathbf{B}[0, t] \rightarrow \mathbb{R}^{l \times 1}$ такие, что $\sup_{F \in \mathbb{F}} \mathbf{E}_F \{ \|\bar{g}_t(O^t)\|^2 \} < \infty$ и $\bar{g}_t(u, v) \equiv 0$ для любого $(u, v) \notin \mathcal{X}[0, t]$.

Пусть $a : \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}^{r \times 1}$ — некоторая известная ограниченная функция. Задана некоторая фиксированная вспомогательная оценка $\bar{a}_t = \bar{a}_t(O^t)$ вектора $a(\gamma(\omega))$, т.е. $\bar{a}_t : \mathbf{C}^m[0, t] \times \mathbf{B}[0, t] \rightarrow \mathbb{R}^r$ — \mathcal{B}_t -измеримая функция такая, что $\sup_{F \in \mathbb{F}, t \in [0, T]} \mathbf{E}_F \{ \|\bar{a}_t(O^t)\|^2 \} < \infty$.

Рассматривается семейство целевых функций J_{O^t} , параметризованное траекторией наблюдений O^t :

$$J_{O^t}(F, \bar{g}_t) \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{E}_F \{ \|g_t - \bar{g}_t(O^t)\|^2 - \|a(\gamma) - \bar{a}_t(O^t)\|^2 | \mathcal{O}_t \} .$$

Задача минимаксного апостериорного оценивания сигнального процесса g_t заключается в нахождении такой оценки \hat{g}_t , что

$$\hat{g}_t \in \text{Arg} \min_{\bar{g}_t \in \mathbb{G}_t} \sup_{F \in \mathbb{F}} J_{O^t}(F, \bar{g}_t) \quad (6)$$

для \mathbf{P}_F -почти всех траекторий O^t одновременно для всех распределений $F \in \mathbb{F}$.

Предложенная задача оценивания является не совсем обычной и нуждается в трактовке.

Во-первых, целевая функция под знаком супремума содержит *условное* математическое ожидание. Этот выбор объясняется тем, что любая прикладная задача оценивания рассматривается в конечном счете «в привязке» к некоторой реализации наблюдений (выборке, траектории и пр.) В случае априорной неопределенности в системе наблюдения использование безусловного минимаксного критерия подразумевает нахождение «наихудших» параметров данной системы безотносительно полученных наблюдений и дальнейшее построение оптимальных оценок для системы с такими параметрами. В отличие от этого, использование предлагаемого условного минимаксного критерия предполагает поиск «наихудших» параметров предполагает поиск «наихудших» параметров применительно не только к самой системе, но и к реализовавшимся наблюдениям.

Во-вторых, оцениваемый сигнальный процесс в задаче является некоторой совместной функцией неопределенных параметров системы наблюдений γ , постоянных во времени, а также текущего (изменяющегося) состояния системы θ_t . Такой

вид оцениваемого процесса позволяет решать одновременно задачу минимаксной идентификации параметров системы наблюдения и фильтрации ее параметров применительно к реализовавшейся траектории наблюдений O^t .

В-третьих, включение в $J_{O^t}(F, \bar{g}_t)$ вычитаемого, зависящего от некоторой опорной оценки \bar{a}_t параметра $a(\gamma)$ связано со следующим обстоятельством. С практической точки зрения наделение неопределенного параметра γ свойством случайности не всегда оправдано. Действительно, в большинстве прикладных задач он является по своей природе точно не известным, но *детерминированным*. Таким образом, приписывание ему случайной природы часто является вынужденной мерой, так как в предположении детерминированности γ соответствующий критерий может не иметь седловой точки на множестве допустимых значений аргументов (см., например, [3] для задач минимаксного оценивания в линейных системах с дискретным временем). Выбор предлагаемого обобщенного квадратичного критерия качества связан именно с необходимостью «компенсировать» зачастую искусственную рандомизацию неизвестного параметра. Дело в том, что во многих прикладных задачах оценивания помимо множества неопределенности для параметра доступна различная дополнительная априорная и/или статистическая информация: оценки некоторых моментов этих параметров, их опорные значения и т. д. Например, дополнительная априорная информация о распределении F вида $\mathbf{E}_F \{ \gamma(\omega) \} = \bar{a}$ может быть интерпретирована указанным образом и включена в критерий. Естественно, что данные такого рода могут сыграть значительную роль при оценивании, и их учет закладывается именно в обобщенном квадратичном критерии.¹

4 Решение задачи минимаксного оценивания

Сигнальный процесс, подлежащий оцениванию, может быть представлен в виде

$$g_t = \mathbf{g}(\gamma_t)\theta_t ,$$

где матрица $\mathbf{g}(\gamma_t) \stackrel{\text{def}}{=} \|g_j(e_i, \gamma_t)\|_{i=1, n, j=1, l}$. В случае, если распределение F известно, СК-оптимальная оценка \hat{g}_t^F данного процесса определяется в соответствии с Предложением 1

¹Доктора А. И. Матасов и Д. В. Болотин в частной беседе с автором обращали внимание на то, что предлагаемый критерий оценивания близок по своей природе к популярному H_∞ -критерию, который «штрафует природу» за шумы высокой мощности в системе. Новый же критерий оценивания штрафует распределения F за большие отклонения случайных величин $a(\gamma)$ от их опорных значений $\bar{a}_t(O^t)$.

$$\widehat{g}_t^F = \left(\int_{\mathcal{C}} \mathbf{1}_{\widetilde{\theta}_t(q)} F(dv) \right)^{-1} \int_{\mathcal{C}} \mathbf{g}(q) \widetilde{\theta}_t(q) F(dq), \quad (7)$$

где $\widetilde{\theta}_t(q)$ — ненормированное распределение состояния θ_t , определяемое уравнением фильтра Вонэма (4) в предположении $\gamma(\omega) = q$. При этом ненормированное математическое ожидание $\widetilde{g}_t^F \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{E}_F \{ \Phi_t g_t | \mathcal{O}_t \}$ вычисляется по формуле

$$\widetilde{g}_t^F = \int_{\mathcal{C}} \mathbf{g}(q) \widetilde{\theta}_t(q) F(dq).$$

Необходимо отметить, что

$$\widetilde{g}_t^q \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\mathbf{g}(q) \widetilde{\theta}_t(q)}{\mathbf{1}_{\widetilde{\theta}_t(q)}}$$

является условным математическим ожиданием оцениваемого процесса g_t в случае, когда распределение F известно и сосредоточено в точке $q \in \mathcal{C}$, а

$$\widetilde{g}_t^q \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{g}(q) \widetilde{\theta}_t(q)$$

является соответствующим ненормированным ожиданием. Очевидно, что имеет место следующая связь между \widetilde{g}_t^F и \widetilde{g}_t^q :

$$\widetilde{g}_t^F = \int_{\mathcal{C}} \widetilde{g}_t^q F(dq).$$

Прежде чем сформулировать основное утверждение о решении задачи минимаксного оценивания, введем в рассмотрение следующий векторный случайный процесс $v_t = v(z_t) \in \mathbb{R}^{(l+r+3) \times 1}$:

$$v_t \stackrel{\text{def}}{=} \text{col}(1, \|a(\gamma)\|^2, a(\gamma), \|g_t\|^2, g_t)$$

и соответствующие ему ненормированные условные ожидания $\widetilde{v}_t^q(q, O^t)$, вычисленные по одноточечным распределениям, сосредоточенным в точках $q \in \mathcal{C}$.

Предложение 2. Пусть для системы наблюдения (3) выполнены предположения I'–V, тогда верны следующие утверждения:

(а) если существует решение двойственной задачи (зависимость оценок от наблюдений O^t в формуле ниже опущена)

$$\begin{aligned} \widehat{F} \in \text{Arg max}_{F \in \mathbb{F}} \left\{ \left(\widehat{\|g_t\|^2}^F - \|\widehat{g}_t^F\|^2 \right) - \right. \\ \left. - \left(\widehat{\|a_t\|^2}^F - \|\widehat{a}_t^F\|^2 \right) - \right. \\ \left. - \mathbf{E}_F \{ \|a(\gamma) - \widehat{a}_t^F\|^2 \} \right\}, \quad (8) \end{aligned}$$

то целевая функция $J_{O^t}(F, \overline{g}_t)$ при \mathbf{P}_F -почти всех O^t ($F \in \mathbb{F}$ — любое допустимое распределение из множества неопределенности) имеет седловую точку $(\widehat{F}, \widehat{\mathbf{g}}_t)$ на множестве $\mathbb{F} \times \mathbb{G}$: наилучшее распределение \widehat{F} является решением (8), а $\widehat{\mathbf{g}}_t = \widehat{\mathbf{g}}_t(O^t) = \widehat{g}_t^{\widehat{F}}(O^t)$ — байесовская оценка, вычисленная с помощью формул (4) и (7) для наилучшего распределения \widehat{F} ; при этом оценка $\widehat{\mathbf{g}}_t$ является решением задачи (6) минимаксного апостериорного оценивания сигнального процесса g_t ;

(б) если оценка $\widetilde{v}_t^q(q, O^t)$ является непрерывной функцией аргумента q при фиксированной траектории наблюдений O^t , то решение двойственной задачи (8) гарантированно существует; при этом также существует вариант наилучшего распределения \widehat{F} , сосредоточенного не более чем в $l + r + 4$ точках множества \mathcal{C} .

Доказательство предложения 2 аналогично доказательству соответствующей теоремы о минимаксном оценивании в скрытых марковских моделях [9].

Замечание 1. Множество \mathbb{F} допустимых распределений, рассмотренное в предложении 2, может быть заменено на любое подмножество, замкнутое в слабой топологии. При этом истинность утверждения (а) предложения сохранится, в то время как выполнение (б) не гарантировано.

Замечание 2. В утверждении (б) предложения 2 говорится о существовании дискретного варианта наилучшего распределения. Вообще говоря, наилучшее распределение в данной задаче не единственно и не обязательно дискретно. Характеризация всего множества наилучших распределений является чрезвычайно трудной задачей, выходящей за рамки предмета исследований данной статьи.

Замечание 3. Из вида двойственной задачи (8) следует, что выбор наилучшего распределения зависит от вида оцениваемого сигнала, т.е. от функции $g(z_t)$: для разных оцениваемых сигналов оно будет разным, и в общем случае «равномерно наилучших» распределений, видимо, не существует.

Замечание 4. В частном случае задачи оценивания (6), когда $g_t = \theta_t$, $a(\gamma) \equiv 0$ и $\overline{a}(O^t) \equiv 0$ (минимаксный фильтр Вонэма), решение задачи минимаксного оценивания имеет простую геометрическую интерпретацию.

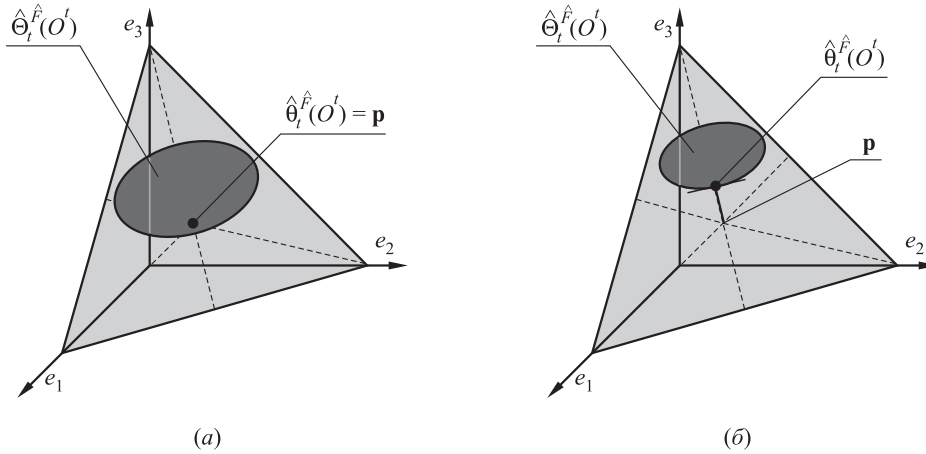


Рис. 1 Геометрическая иллюстрация минимаксного фильтра Вонэма: (а) случай № 1 взаимного расположения множества возможных оценок $\hat{\theta}_t^{\hat{F}}(O^t)$ и наилучшей оценки \mathbf{p} ; (б) случай № 2 взаимного расположения множества возможных оценок $\hat{\theta}_t^{\hat{F}}(O^t)$ и наилучшей оценки \mathbf{p}

Рассмотрим случайный вектор X , имеющий дискретное распределение на множестве S_n со средним $p \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{E}_p \{X\}$, и определим, какое распределение X максимизирует критерий

$$\mathbf{E}_p \{ \|X - \mathbf{E}_p \{X\}\|^2 \} = \text{tr}\{\text{diag}(p) - pp^*\} = 1 - \|p\|^2,$$

т. е. обладает «наибольшим разбросом» вокруг своего математического ожидания. Оказывается, что таким свойством обладает дискретное равномерное распределение на S_n : $\mathbf{p} = \text{col}(1/n, \dots, 1/n)$ и при этом

$$\max_{p \in \Pi} \mathbf{E}_p \{ \|X - \mathbf{E}_p \{X\}\|^2 \} = 1 - \frac{1}{n},$$

где $\Pi \stackrel{\text{def}}{=} \{x \in \mathbb{R}^n, x_i \geq 0, i = 1, \dots, n, \mathbf{1}x = 1\}$ — «вероятностный симплекс», т. е. множество *всех* возможных распределений p . Если множеством допустимых средних значений p является некоторое подмножество \mathcal{Q} «вероятностного» симплекса Π , то наибольшим разбросом обладает распределение со средним значением, ближайшим к равномерному, т. е.

$$\begin{aligned} \text{Arg max}_{p \in \mathcal{Q}} \mathbf{E}_p \{ \|X - \mathbf{E}_p \{X\}\|^2 \} = \\ = \text{Arg min}_{p \in \mathcal{Q}} \|p - \mathbf{p}\|^2 = \text{Arg min}_{p \in \mathcal{Q}} \|p\|^2. \end{aligned}$$

Пусть $\mathcal{Q} = \hat{\Theta}_t^{\hat{F}}(O^t)$ — множество всех допустимых условных математических ожиданий $\hat{\theta}_t^{\hat{F}}(O^t)$, вычисленных с помощью (4) и (7) по фиксированной траектории наблюдений O^t . Если $\mathbf{p} \in \mathcal{Q}$, то наилучшее распределение \hat{F} таково, что оно приводит условное математическое ожидание $\hat{\theta}_t^{\hat{F}}(O^t)$ в точку \mathbf{p} (равномерное распределение) в момент времени t

(рис. 1, а). Если $\mathbf{p} \notin \mathcal{Q}$, то наилучшее распределение \hat{F} таково, что оно приводит условное математическое ожидание в точку из \mathcal{Q} , ближайшую к равномерному распределению \mathbf{p} (рис. 1, б).

5 Иллюстративный пример: мониторинг состояния ТСР-соединения в условиях неопределенности

Рассмотрим модель Джилберта функционирования соединения по протоколу ТСР [11]. Предполагается, что состояние данного соединения, недоступное прямому наблюдению, описывается МСПКЧС θ_t с двумя состояниями: «хорошим» ($\theta_t = e_1$) и «плохим» ($\theta_t = e_2$). Соответствующая система наблюдения, являющаяся частным случаем (1), имеет вид

$$\theta_t = \theta_0 + \int_0^t \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_1 \\ \lambda_2 & -\lambda_2 \end{bmatrix}^* \theta_{s-} ds + M_t^\theta,$$

$$Q_t = \int_0^t [\mu_1 \quad \mu_2] \theta_{s-} ds + M_t^Q,$$

$$U_t = \int_0^t [A_1 \quad A_2] \theta_{s-} ds + \varepsilon W_t.$$

Матрица интенсивностей переходов Λ процесса θ_t априори неизвестна, однако обычно известны диапазоны возможных значений ее элементов: $\lambda_i \in [\underline{\lambda}_i, \bar{\lambda}_i]$, $i = 1, 2$.

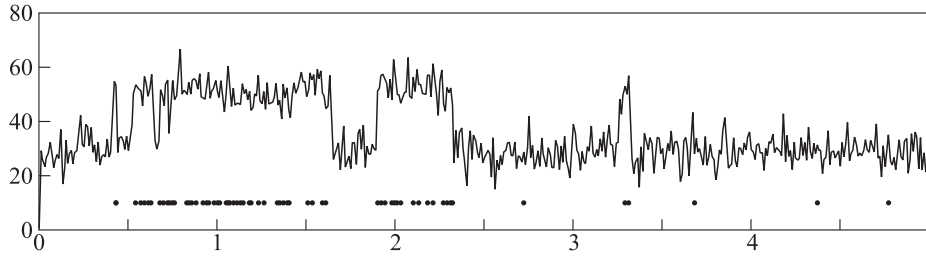


Рис. 2 Наблюдения: сплошная черная линия — масштабированные приращения непрерывных наблюдений $\Delta U_t/\Delta t$; черные точки — моменты потерь пакетов Q_t

Далее, в протоколе TCP доступным наблюдению является поток потерь пакетов Q_t , относительно которого предполагается, что он является считающим с интенсивностью $\mu\theta$, зависящей от текущего состояния соединения θ_t . Очевидно, $\mu_2 > \mu_1$, т. е. интенсивность потерь пакетов в «плохом» состоянии выше, чем в «хорошем». Истинные значения интенсивностей также точно не известны, но даны возможные диапазоны их изменений: $\mu_i \in [\underline{\mu}_i, \overline{\mu}_i]$, $i = 1, 2$.

Непрерывные наблюдения U_t представляют собой интегральные исторические данные о времени подтверждения доставки пакетов (RTT): A_1 и A_2 являются неизвестными средними значениями RTT, соответственно, в «хорошем» и «плохом» состояниях ($A_2 > A_1$), а винеровский процесс εW_t описывает флуктуации RTT. Вектор A является неопределенным так же, как Λ и μ , и его множество неопределенности вновь задано: $A_i \in [\underline{A}_i, \overline{A}_i]$, $i = 1, 2$.

Задача состоит в оперативном оценивании состояния θ_t TCP-соединения в условиях априорной неопределенности как в уравнении состояния, так и в наблюдениях. Предлагаемую прикладную задачу можно рассматривать как частный случай исследованной задачи минимаксной фильтрации (6) (минимаксной фильтрации Вонэма).

Численное моделирование проводилось со следующими значениями параметров: $\lambda_1 = 1,9$, $\lambda_2 = 5,1$, $A_1 = 29$, $A_2 = 51$, $\mu_1 = 0,5$, $\mu_2 = 60$, $\varepsilon = 0,5$.

Неопределенность была задана следующими границами: $\underline{\lambda}_1 = 0,5$, $\overline{\lambda}_1 = 2$, $\underline{\lambda}_2 = 5$, $\overline{\lambda}_2 = 25$, $\underline{A}_1 = 20$, $\overline{A}_1 = 30$, $\underline{A}_2 = 50$, $\overline{A}_2 = 120$, $\underline{\mu}_1 = 0,1$, $\overline{\mu}_1 = 1,1$, $\underline{\mu}_2 = 50$, $\overline{\mu}_2 = 100$.

На рис. 2 приведены масштабированные приращения непрерывных наблюдений $\Delta U_t/\Delta t$ ($\Delta t = 0,01$) и моменты потерь пакетов Q_t .

На рис. 3 показано истинное значение индикатора «хорошего» состояния $\theta_t^* e_1$ в сравнении с оценкой фильтра Вонэма, вычисленной при известных значениях тройки (Λ, μ, A) , и предлагаемая минимаксная оценка.

На рис. 4 сравниваются индикатор $\theta_t^* e_1$ с предлагаемой минимаксной оценкой и оценкой фильтрации Вонэма, в которой неопределенные (Λ, μ, A) заменены на их опорные значения — центры соответствующих множеств неопределенности: $\lambda_i^{gv} = (\underline{\lambda}_i + \overline{\lambda}_i)/2$, $\mu_i^{gv} = (\underline{\mu}_i + \overline{\mu}_i)/2$, $A_i^{gv} = (\underline{A}_i + \overline{A}_i)/2$, $i = 1, 2$.

Ясно, что качество оценивания, предоставляемое минимаксным фильтром и фильтром Вонэма, вычисленным по опорным значениям, не может быть корректно сопоставлено с качеством фильтра Вонэма, вычисленного при известных точных значениях (Λ, μ, A) , из-за разной априорной информации, используемой при оценивании. Тем не менее для некоторой оценки ν состояния θ рассмотрим среднюю \mathcal{L}_2 норму ее ошибки:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \|\theta_t - \nu_t\|^2 dt.$$

Будучи вычисленным для $T = 10$ в этом примере, данный показатель качества оказался равен 0,00438 для фильтра Вонэма, вычисленного при известных (Λ, μ, A) , 0,1753 для минимаксного фильтра, и 0,46246 для фильтра Вонэма, вычисленного по опорным значениям. Дело в том, что неопределенность параметров, соответствующих «плохому» состоянию, шире, и выбранные опорные значения оказались далеки от истинных значений. В этом заключается причина неудовлетворительной идентифицируемости «плохого» состояния фильтром Вонэма, вычисленным по опорным значениям (см., например, интервалы (0,68, 1,63) и (1,9, 2,32) на рис. 4). На этих интервалах указанный фильтр Вонэма демонстрирует осциллирующий характер. Это означает, что для надежной идентификации «плохого» состояния фильтром Вонэма, вычисленным по опорным значениям, недостаточно наблюдений, а требуется более точная априорная информация. В этой же ситуации предлагаемый минимаксный фильтр оказывается более робастным, предлагая «нейтральную» равномерную оценку $\theta_t = \text{col}(0,5, 0,5)$.

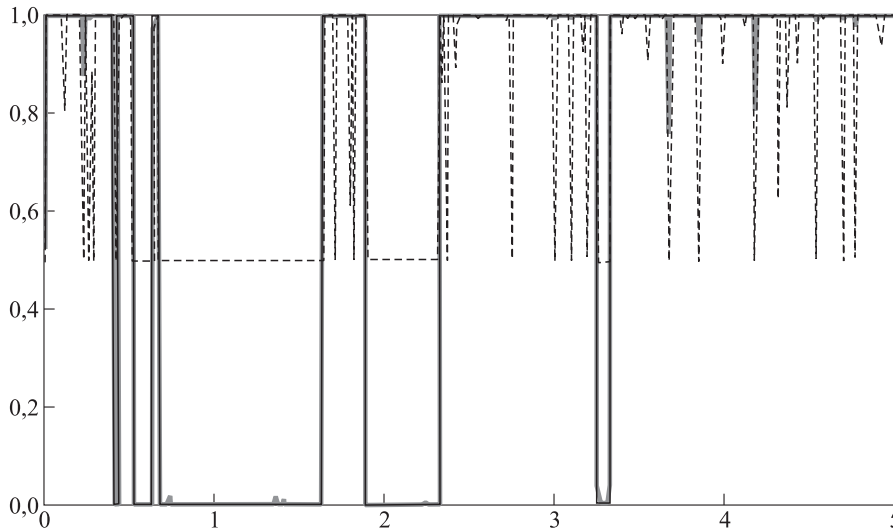


Рис. 3 Индикатор «хорошего» состояния (серая жирная линия), оценка фильтра Вонэма при известных (Λ, μ, A) (черная сплошная линия) и минимаксная оценка (пунктирная линия)

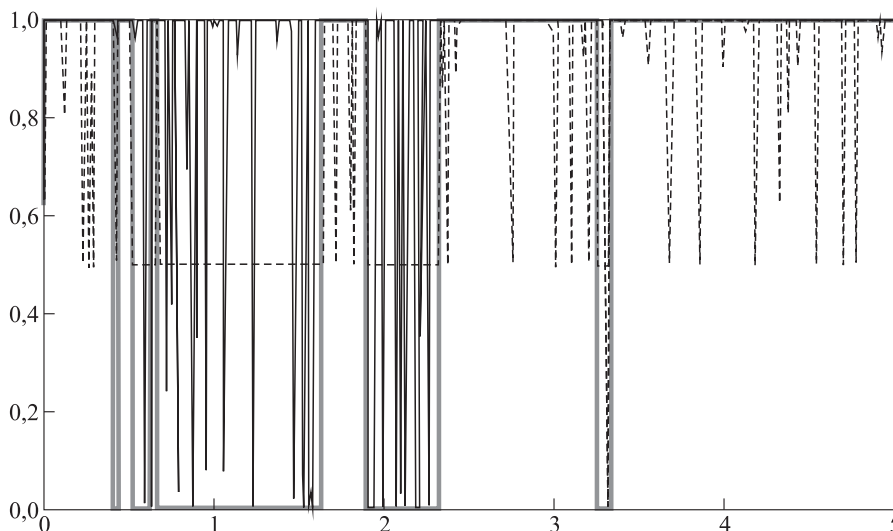


Рис. 4 Индикатор «хорошего» состояния (серая жирная линия), оценка фильтра Вонэма при опорных значениях (Λ, μ, A) (черная сплошная линия) и минимаксная оценка (пунктирная линия)

6 Заключение

В статье представлены следующие результаты.

1. Задача оценивания в системе наблюдения с МСПКЧС, содержащей неопределенность в уравнении состояния и наблюдениях, сформулирована в игровой (минимаксной) постановке.
2. Предложено утверждение, определяющее решение указанной минимаксной задачи оценивания: предъявлены условия существования седловой точки, представлена двойственная задача оптимизации, определяющая наихудшее распределение, а также найдены некоторые характери-

стики этих распределений и соответствующих минимаксных оценителей.

3. Применимость предлагаемых минимаксных оценок проиллюстрирована на примере оперативного оценивания состояния ТСР-соединения в условиях априорной неопределенности по историческим данным RTT и потоку потерь пакетов.

В то же время, полученные результаты определяют задачи, требующие решения. Во-первых, практическое использование предлагаемых минимаксных оценок требует разработки эффективных численных схем реализации данных оценок. Во-

вторых, актуальным является поиск легко проверяемых условий, гарантирующих существование решения двойственной задачи. В-третьих, рассмотрение задач управления в соответствующей минимаксной постановке также выглядит весьма перспективным.

Литература

1. *Kalman R. E., Bucy R. S.* New results in linear filtering and prediction problems // *Trans. ASME*, 1961. Ser. D. Vol. 83. P. 95–111.
2. *Wonham W. N.* Some applications of stochastic differential equations to optimal nonlinear filtering // *SIAM J. of Control*, 1965. No. 2. P. 347–369.
3. *Martin C. J., Mintz M.* Robust filtering and prediction for linear systems with uncertain dynamics: A game-theoretic approach // *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 1983. Vol. 9. P. 888–896.
4. *Ананьев Б. И.* Минимаксная линейная фильтрация многошаговых процессов с неопределенными распределениями возмущений // *АиТ*, 1993. № 10. С. 131–139.
5. *Кац И. Я., Куржанский А. Б.* Минимаксная многошаговая фильтрация в статистически неопределенных ситуациях // *АиТ*, 1978. № 11. С. 79–87.
6. *Панков А. Р., Миллер Г. Б.* Фильтрация случайного процесса в статистически неопределенной линейной стохастической дифференциальной системе // *АиТ*, 2005. № 1. С. 59–71.
7. *Siemenikhin K. V., Lebedev M. V., Platonov E. N.* Kalman filtering by minimax criterion with uncertain noise intensity functions // *Proc. Joint 44th IEEE Conf. on Decision and Control and European Control Conf. (CDC-ECC'2005)*. — Seville, 2005. P. 1929–1934.
8. *Elliott R. J., Aggoun L., Moore J. B.* Hidden Markov models: Estimation and control. — Berlin: Springer-Verlag, 1995.
9. *Борисов А. В.* Минимаксное апостериорное оценивание в скрытых марковских моделях // *АиТ*, 2007. № 11. С. 31–45.
10. *Борисов А. В.* Минимаксное апостериорное оценивание марковских процессов с конечным числом состояний // *АиТ*, 2008 (в печати).
11. *Gilbert E. M.* Capacity of a burst-noise channel // *Bell Syst. Tech. J.*, 1960. № 5. P. 1253–1265.
12. *Липцер Р. Ш., Ширяев А. Н.* Теория мартигалов. — М.: Наука, 1986.
13. *Дуб Дж. Л.* Вероятностные процессы. — М.: ИЛ, 1956.
14. *Wong E., Hajek B.* Stochastic processes in engineering systems. — New York: Springer, 1985.
15. *Эллиотт Р.* Стохастический анализ и его приложения. — М.: Мир, 1986.
16. *Липцер Р. Ш., Ширяев А. Н.* Статистика случайных процессов. — М.: Наука, 1974.

БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ*

А. А. Кудрявцев¹, С. Я. Шоргин²

Аннотация: В данной работе рассматривается байесовский подход к постановке определенных задач теории массового обслуживания и теории надежности. Соответствующий метод предусматривает рандомизацию характеристик систем относительно некоторых априорных распределений их параметров. Данный подход может использоваться, в частности, для вычисления моментных характеристик для вероятностно-временных и надежностных характеристик больших групп систем или устройств. В работе приведена сводка результатов, полученных ранее; представлены новые результаты для случая, когда в качестве априорного рассматривается распределение Эрланга.

Ключевые слова: байесовский подход; системы массового обслуживания; надежность; смешанные распределения; моделирование

1 Введение и основные предположения

Теория массового обслуживания — весьма развитая математическая дисциплина. В рамках этой теории получено огромное количество глубоких с точки зрения математики и важных с прикладной точки зрения результатов, относящихся к исследованию систем и сетей массового обслуживания (СМО), представляющих собой модели широкого класса реальных систем, прежде всего информационно-телекоммуникационных систем и сетей. В настоящее время развитие теории массового обслуживания ведется, в основном, в направлении рассмотрения все более сложных по вероятностным характеристикам входящих потоков и распределений времени обслуживания, все более сложных дисциплин обслуживания, в интересах более адекватного отражения реальных процессов.

Одним из направлений обобщения и усложнения постановок является усложнение вероятностной структуры тех или иных входных параметров СМО. В частности, вместо традиционных входящих потоков рассматриваются потоки Кокса, самоподобные потоки, марковские и полумарковские потоки и т.п. Аналогичные обобщения осуществляются и по отношению к распределениям времени обслуживания. В определенной степени эти обобщения могут интерпретироваться как результат рандомизации тех или иных параметров более «простых» потоков и распределений обслуживания.

Так, процесс Кокса получается в результате специальной рандомизации интенсивности пуассоновского потока и т.п.

Все эти обобщенные современные постановки предполагают, что стохастический механизм рандомизации «влияет» на параметры системы непосредственно в период ее функционирования, то есть мы изначально знаем, с какой системой «имеем дело», пусть даже эта система достаточно сложна, и исследуем характеристики функционирования именно этой «изначально фиксированной» системы.

Однако в реальной практике часты ситуации, при которых сама исследуемая система задана в определенном смысле «неточно».

Например, если даже говорить о простейших системах типа $M|G|1$, исследователю могут быть априори не известны параметр входящего потока λ и параметры обслуживания μ и σ^2 . Такие ситуации возникают, скажем, в случае, когда рассматривается целый класс однотипных СМО, относительно которых известны только типы входящего потока и распределения обслуживания, а также дисциплина обслуживания, но конкретные параметры этих потоков и распределений, вообще говоря, различны для разных СМО данного класса. Исследователь априори не знает, с какой СМО из данного класса он имеет дело (это может иметь место, например, при исследовании серии однотипных устройств коммутации или передачи, выпускаемых одним и тем же производителем, для которых разброс значений тех или иных показателей обуславливается естествен-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 05-07-90103.

¹ Факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М. В. Ломоносова, nubigena@hotmail.com

² Институт проблем информатики Российской академии наук, sshorgin@ipiran.ru

ными технологическими вариациями при производстве; возможны и другие примеры). В этом случае, поскольку неизвестными являются именно «исходные» параметры потоков и времени обслуживания, естественным является рандомизационный подход, при котором элементы вероятностного пространства становятся (если рассматривать приведенный выше пример) значения λ , μ и σ^2 (а в общем случае можно говорить о вероятностном пространстве, элементами которого являются сами однотипные СМО). При этом подлежащие вычислению характеристики такой «рандомизированной» СМО, естественно, являются рандомизацией аналогичных характеристик «обычной» СМО того же типа — с учетом того априорного распределения входных параметров СМО, которое взято исследователем за основу.

Таким образом, в том же примере с системой типа $M|G|1$ возникают задачи рандомизации «обычных» характеристик таких систем с учетом априорных распределений входных параметров. Скажем, может приниматься предположение о показательном, равномерном или каком-то другом распределении одной или нескольких из величин λ , μ и σ^2 (которые при таком подходе становятся случайными величинами), об их независимости или зависимости и т. п. Полученные результаты могут применяться, например, для вычисления средних значений, построения доверительных интервалов для тех или иных характеристик рассматриваемого класса СМО «в целом». Такой подход к построению моделей массового обслуживания естественно назвать байесовским. Впервые он сформулирован в [1].

Другим направлением применения байесовского подхода является оценка надежности. Как известно [2], коэффициент готовности восстанавливаемого устройства в стационарном режиме может быть вычислен по формуле

$$k = \frac{\lambda^{-1}}{\lambda^{-1} + \mu^{-1}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu},$$

где λ^{-1} — среднее время безотказной работы, μ^{-1} — среднее время восстановления. Если мы примем сформулированное выше предположение, в соответствии с которым любое изучаемое устройство выбирается случайным образом из некоторого множества сходных устройств, различающихся средними величинами показателей надежности, то, согласно приведенным выше рассуждениям, значения λ и μ можно рассматривать в качестве случайных. Следовательно, при таких предположениях коэффициент готовности k также является случайной величиной, и его распределение зависит от распределений величин λ и μ . Результаты, получаемые

в рамках такой постановки, могут использоваться, в частности, для вычисления средних значений и построения доверительных интервалов для надежности характеристик всей изучаемой группы устройств.

Данная работа является логическим продолжением статьи [3], в которой авторы рассматривали вероятностные характеристики коэффициента загрузки ρ , вероятности потерь $1 - \pi$ (здесь π — вероятность того, что входящий в СМО вызов не будет потерян) и коэффициента готовности k в системе $M|M|1|0$ в предположении об экспоненциальном и равномерном распределении параметров λ и μ . В работе будет рассмотрен еще один вид зависимости вероятностных и моментных характеристик случайных величин ρ , π и k в предположении, что параметр входящего потока λ и параметр обслуживания μ независимы и имеют вырожденное распределение и распределение Эрланга соответственно.

2 Вводный пример

Рассмотрим ситуацию, когда некий наблюдатель (исследователь) имеет дело с достаточно большой серией систем обслуживания $M|M|1|0$, различающихся только параметром распределения обслуживания. В частности, это могут быть некие станки, коммутаторы, маршрутизаторы или другие обслуживаемые средства, о которых заранее известно, что их функционирование описывается системой вышеуказанного типа. То есть эти системы идентичны по дисциплине обслуживания и по типам входящего потока и распределения времени обслуживания. В рассматриваемом примере характеристики входящего потока также предполагаются идентичными для всех систем данной серии; различаются только численные характеристики обслуживания (то есть параметры показательного распределения).

Разброс характеристик обслуживания обуславливается технологическими (конструктивными) причинами. И главным аспектом рассматриваемой постановки является то, что исследователю не известно, каково конкретное значение параметра обслуживания рассматриваемой им «взятой наугад» системы из данной серии. Известно лишь «априорное» распределение этого параметра (поскольку серия систем мыслится большой, то можно в рамках этой серии рассматривать стохастические явления и вводить вероятностные распределения). Исследователя интересуют характеристики обслуживания для серии в целом (или характеристики «наугад взятой» системы). Очевидно, что помимо

традиционных факторов стохастичности, имеющих место в СМО (стохастичность поступающего потока и процессов обслуживания), появляется еще один фактор, связанный со случайностью выбора рассматриваемой системы.

Пусть, скажем, параметр обслуживания μ у рассматриваемых систем может принимать только два значения μ_1 и μ_2 с вероятностями соответственно p_1 и p_2 . «Физически» это означает, что среди рассматриваемой серии систем (маршрутизаторов, станков и т. п.) встречаются только две «разновидности» обслуживающих приборов: приборы первой разновидности осуществляют обслуживание с параметром μ_1 , приборы второй разновидности — с параметром μ_2 . Тогда у «взятой наугад» системы коэффициент загрузки становится случайной величиной, принимающей значения λ/μ_1 с вероятностью p_1 и λ/μ_2 с вероятностью p_2 . Стационарная вероятность блокировки «выбранной» системы в связи с вмешательством случайного фактора выбора конкретной системы сама становится «случайной» и принимает значения $\lambda/(\lambda + \mu_1)$ с вероятностью p_1 (это вероятность того, что исследователю «попалась» система первой «разновидности») и $\lambda/(\lambda + \mu_2)$ с вероятностью p_2 («попалась» система второй «разновидности»). Естественно, «усредненная» вероятность блокировки в такой «байесовской» СМО равна $p_1\lambda/(\lambda + \mu_1) + p_2\lambda/(\lambda + \mu_2)$.

Как видим, для исследования байесовских СМО нет необходимости проводить анализ системы методами теории массового обслуживания. Байесовская система является «рандомизацией» некоторой «обычной» СМО, и, соответственно, характеристики байесовской СМО вычисляются путем рандомизации последующего усреднения (по априорному распределению параметра или параметров) уже вычисленных ранее методами теории массового обслуживания характеристик «обычной» СМО. То есть математическая часть работы сводится именно к этой рандомизации и усреднению. При этом как с технической, так и с концептуальной точек зрения целесообразно осуществлять рандомизацию стационарных характеристик «обычных» СМО, получая стационарные характеристики байесовских СМО.

Отметим еще одну содержательную модель, математическим описанием которой может служить байесовская СМО. Предположим, что исследователь рассматривает не серию систем, а некоторую одну систему, количественные параметры которой меняются со временем. Например, имеется обслуживающее устройство, один из элементов которого в заранее не известные моменты заменяется на другой, потом на третий и т. п. Скажем, такой системой является пограничный пост в аэропорту, погранич-

ник на котором иногда сменяется — в моменты времени, не известные наблюдателю (пассажиру); наблюдатель знает лишь вероятность того, что он «наткнется» на некоторого конкретного пограничника, и среднее время проверки паспорта каждым из возможных пограничников.

При таком подходе структура системы и дисциплина обслуживания не изменяются со временем, а изменяется только количественный параметр распределения обслуживания (например, интенсивность). Аналогичным образом может меняться и параметр поступающего потока. О том, когда происходят изменения, информации нет. Исследователю известно только распределение значений «изменяемых», случайных параметров, с которыми он «сталкивается», рассматривая систему в «случайный» момент времени.

Поскольку предполагается, что информации о моментах «перестройки» системы или хотя бы о распределении этих моментов у исследователя нет, описание переходных процессов в системе такого рода невозможно. Следовательно, возможен анализ (и последующая рандомизация) только стационарных распределений рассматриваемой СМО. Для того чтобы такая постановка имела смысл, необходимо ввести предположение, что система изменяется достаточно «редко» — так, чтобы на каждом интервале постоянства параметров СМО «успевала» достичь стационарного состояния. Естественно, результаты такого анализа будут приближенными, поскольку в реальной жизни стационарное состояние, строго говоря, не достигается.

3 Обзор полученных ранее результатов

Напомним, что данная работа посвящена рассмотрению системы $M|M|1|0$. Для большей полноты картины приведем вкратце результаты, опубликованные в [3].

Рассмотрим произвольную СМО, в которой интенсивность входящего потока λ и интенсивность обслуживания μ независимы и имеют равномерное распределение. Такая модель приемлема для описания ситуации, когда для обоих значений λ и μ (или для любого из них) задан допустимый интервал значений, но реальная величина λ и/или μ может варьироваться в этих пределах.

Загрузка рассматриваемой системы $\rho = \lambda/\mu$. Как известно, от значения ρ зависит наличие стационарного режима у рассматриваемой системы; величина ρ входит во многие формулы, описывающие характеристики разнообразных СМО. В свя-

зи с этим рассмотрение величины ρ представляется одной из первоочередных задач, которые следует исследовать в рамках байесовской теории СМО.

Пусть носителем случайной величины λ является некоторый отрезок $[a_\lambda, b_\lambda]$, носителем случайной величины μ — некоторый отрезок $[a_\mu, b_\mu]$, причем $0 \leq a_\lambda \leq b_\lambda, 0 \leq a_\mu \leq b_\mu$.

При этом функция распределения случайной величины ρ может быть записана таким образом:

$$P(\rho < x) = \iint_{\lambda/\mu < x} \frac{1}{(b_\lambda - a_\lambda)(b_\mu - a_\mu)} d\lambda d\mu.$$

Дальнейшие выкладки существенно зависят от соотношения между величинами a_λ/a_μ и b_λ/b_μ . Предположим для определенности, что $a_\lambda/a_\mu \leq b_\lambda/b_\mu$. Обозначим

$$K = \frac{1}{(b_\lambda - a_\lambda)(b_\mu - a_\mu)}.$$

Тогда при $x < a_\lambda/b_\mu$

$$P(\rho < x) = 0,$$

при $a_\lambda/b_\mu \leq x \leq a_\lambda/a_\mu$

$$P(\rho < x) = K \frac{(b_\mu x - a_\lambda)^2}{2x},$$

при $a_\lambda/a_\mu \leq x \leq b_\lambda/b_\mu$

$$P(\rho < x) = K \left(\frac{a_\mu + b_\mu}{2} x - a_\lambda \right) (b_\mu - a_\mu),$$

при $b_\lambda/b_\mu \leq x \leq b_\lambda/a_\mu$

$$P(\rho < x) = 1 - K \frac{(b_\lambda - a_\mu x)^2}{2x},$$

при $x > b_\lambda/a_\mu$

$$P(\rho < x) = 1.$$

Выпишем плотность случайной величины ρ .
При $x < a_\lambda/b_\mu$

$$f_\rho(x) = 0,$$

при $a_\lambda/b_\mu \leq x \leq a_\lambda/a_\mu$

$$f_\rho(x) = K \left(\frac{b_\mu}{2} - \frac{a_\lambda^2}{2x^2} \right),$$

при $a_\lambda/a_\mu \leq x \leq b_\lambda/b_\mu$

$$f_\rho(x) = K \frac{b_\mu^2 - a_\mu^2}{2},$$

при $b_\lambda/b_\mu \leq x \leq b_\lambda/a_\mu$

$$f_\rho(x) = K \left(\frac{b_\lambda^2}{2x^2} - \frac{a_\mu^2}{2} \right),$$

при $x > b_\lambda/a_\mu$

$$f_\rho(x) = 0.$$

Проведя элементарные выкладки, получаем, что среднее значение и второй момент случайной величины ρ равны соответственно:

$$E\rho = \frac{b_\lambda + a_\lambda}{2(b_\mu - a_\mu)} \ln \frac{b_\mu}{a_\mu};$$

$$E\rho^2 = \frac{a_\lambda^2 + a_\lambda b_\lambda + b_\lambda^2}{3a_\mu b_\mu}.$$

Очевидно, что при $(b_\lambda - a_\lambda) \rightarrow 0$ и при $(b_\mu - a_\mu) \rightarrow 0$, то есть при стягивании носителя случайной величины λ к некоторой фиксированной точке λ_0 и при стягивании носителя случайной величины μ к некоторой фиксированной точке μ_0 значение $E\rho$, как это и должно быть, стремится к λ_0/μ_0 , а значение $E\rho^2$ — к λ_0^2/μ_0^2 . Такая постановка задачи соответствует случаю, когда один или оба параметра λ и/или μ имеют вырожденное распределение.

Заметим также, что зависимость среднего значения величины ρ от распределения λ сводится к зависимости от математического ожидания λ . В то же время зависимость $E\rho$ от параметров распределения μ носит более сложный вид.

В случае $a_\lambda/a_\mu \geq b_\lambda/b_\mu$ формулы для функции распределения и плотности случайной величины ρ аналогичны (здесь они опущены для сокращения объема изложения). Математическое ожидание и второй момент случайной величины ρ в указанном случае совпадают с выписанными выше значениями.

На основании полученных результатов нетрудно вычислить другие необходимые характеристики величины ρ .

Заметим, что рассмотренная модель позволяет изучать важную ситуацию, в которой $\lambda < \mu$ с вероятностью 1. При этом $\rho < 1$, что является условием эргодичности систем с одним обслуживающим прибором. В силу постулируемой независимости случайных величин λ и μ обеспечить выполнение условия $\lambda < \mu$ может только соответствующее взаимное расположение отрезков $[a_\lambda, b_\lambda]$ и $[a_\mu, b_\mu]$, то есть выполнение условия $0 \leq a_\lambda \leq b_\lambda \leq a_\mu \leq b_\mu$.

Теперь рассмотрим случай показательной распределенности параметров λ и μ в системе $M|M|1|0$. Подобную модель целесообразно рассматривать в качестве «первого приближения» в ситуациях, когда никакой априорной информации о значениях λ

и μ нет, за исключением данных об их средних значениях (пусть они равны соответственно $1/l$ и $1/m$). Предположение о независимости λ и μ сохраняется.

В целях сокращения объема изложения остановимся лишь на конечных выражениях интересующих нас характеристик.

Несложно показать, что при $x \geq 0$

$$P(\rho < 0) = \frac{lx}{m + lx}.$$

Отсюда, в частности, следует, что случайная величина $\rho = \lambda/\mu$ в данном случае, в отличие от ситуации, рассмотренной в предыдущем примере, не имеет моментов первого и более высоких порядков. Однако некоторые другие характеристики байесовских СМО, зависящие от случайного ρ , могут иметь конечные моменты.

Рассмотрим, например, вероятность того, что поступивший в систему вызов не будет потерян. В стационарном режиме эта вероятность равна, в соответствии с формулами Эрланга, $\pi = 1/(1 + \rho)$. В «байесовской» постановке эта вероятность, как было отмечено выше, сама становится «случайной». Рассмотрим распределение случайной величины π в условиях рассматриваемой модели.

При $0 \leq x \leq 1$ функция распределения и плотность случайной величины π имеют вид соответственно

$$F_{\pi}(x) = \frac{mx}{mx + l(1-x)};$$

$$f_{\pi}(x) = \frac{ml}{(mx + l(1-x))^2},$$

а усредненная вероятность непотери вызова —

$$E\pi = \frac{ml}{(m-l)^2} \left(\ln \frac{m}{l} + \frac{l}{m} - 1 \right).$$

Нетрудно вычислить также второй момент случайной величины π и другие ее характеристики. Заметим, что при $m = l$

$$E\pi = \frac{l}{2}.$$

Значение

$$\pi = \frac{1}{1 + \rho} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

совпадает с величиной коэффициента готовности k . Следовательно, распределение случайного коэффициента готовности в случае, когда величины λ и μ имеют показательное распределение, представлено выше в качестве распределения случайной величины π .

4 Основные результаты

Итак, рассмотрим, как и ранее, систему $M|M|1|0$. Пусть параметр входящего потока λ имеет вырожденное распределение, а параметр обслуживания μ имеет распределение Эрланга с параметрами n и α . Нашей первой целью является нахождение функции распределения и плотности случайных величин

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad \text{и} \quad k = \pi = \frac{1}{1 + \rho}.$$

Найдем функцию распределения $F_{\rho}(x)$ случайной величины ρ . Имеем

$$\begin{aligned} F_{\rho}(x) &= 1 - P\left(\mu < \frac{\lambda}{x}\right) = \\ &= 1 - \int_0^{\lambda/x} \frac{t^{n-1} \alpha^n e^{-\alpha t}}{(n-1)!} dt = \\ &= 1 - \frac{1}{(n-1)!} \int_0^{\alpha\lambda/x} z^{n-1} e^{-z} dz = \\ &= e^{-\alpha\lambda/x} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha\lambda)^k}{x^k k!}, \quad x > 0. \end{aligned}$$

Продифференцировав последнее выражение по x , найдем плотность величины ρ :

$$f_{\rho}(x) = e^{-\alpha\lambda/x} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha\lambda)^k (\alpha\lambda - kx)}{k! x^{k+2}}, \quad x > 0.$$

Очевидно, что при данной постановке задачи величина ρ не имеет моментов первого и более высоких порядков:

$$E\rho = \int_0^{\infty} e^{-\alpha\lambda/x} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha\lambda)^k (\alpha\lambda - kx)}{k! x^{k+1}} dx = \infty.$$

Рассмотрим вероятностные характеристики вероятности «непотери» вызова π . Для функции распределения имеем

$$\begin{aligned} F_{\pi}(x) &= 1 - P\left(\rho < \frac{1-x}{x}\right) = \\ &= 1 - e^{-\alpha\lambda x/(1-x)} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha\lambda)^k x^k}{(1-x)^k k!}, \quad x \in (0, 1). \end{aligned}$$

В этом случае плотность π вычисляется по формуле

$$f_{\pi}(x) = e^{-\alpha\lambda x/(1-x)} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha\lambda)^k x^{k-1} (\alpha\lambda x - kx + k)}{k!(1-x)^{k+2}},$$

$$x \in (0, 1).$$

Найдем математическое ожидание и дисперсию случайной величины π . Имеем

$$\begin{aligned} E\pi &= \int_0^1 e^{-\alpha\lambda x/(1-x)} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha\lambda)^k x^k (\alpha\lambda x - kx + k)}{k!(1-x)^{k+2}} dx = \\ &= \int_0^{\infty} e^{-z} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{z^k (z+k)}{k!(\alpha\lambda+z)} dz = \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k!} \left[\int_0^{\infty} \frac{e^{-z} z^{k+1}}{\alpha\lambda+z} dz + k \int_0^{\infty} \frac{e^{-z} z^k}{\alpha\lambda+z} dz \right]. \end{aligned}$$

Для упрощения дальнейших выкладок введем следующее обозначение. Пусть $Ei(x)$ — интегральная показательная функция:

$$Ei(x) = - \int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt.$$

Используя [4] (формула 567.9) и [5] (формула 3.351), вычислим при $k \geq 1$ интеграл

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \frac{e^{-z} z^k}{\alpha\lambda+z} dz &= \int_{\alpha\lambda}^{\infty} \frac{e^{\alpha\lambda} e^{-t} (t-\alpha\lambda)^k}{t} dt = e^{\alpha\lambda} (-\alpha\lambda)^k \int_{\alpha\lambda}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt + \\ &+ e^{\alpha\lambda} \int_{\alpha\lambda}^{\infty} e^{-t} \sum_{l=1}^k C_k^l t^{l-1} (-\alpha\lambda)^{k-l} dt = \\ &= -e^{\alpha\lambda} (-\alpha\lambda)^k Ei(-\alpha\lambda) + \\ &+ e^{\alpha\lambda} \sum_{l=1}^k C_k^l (-\alpha\lambda)^{k-l} \int_{\alpha\lambda}^{\infty} e^{-t} t^{l-1} dt = \\ &= -e^{\alpha\lambda} (-\alpha\lambda)^k Ei(-\alpha\lambda) + \\ &+ \sum_{l=1}^k \sum_{m=0}^{l-1} (-1)^{k-l} (\alpha\lambda)^{k-l+m} \frac{k!}{l(k-l)!m!}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} E\pi &= 1 + e^{\alpha\lambda} \alpha\lambda Ei(-\alpha\lambda) - \\ &- \sum_{k=1}^{n-1} \frac{e^{\alpha\lambda} (-\alpha\lambda)^k Ei(-\alpha\lambda) (k-\alpha\lambda)}{k!} + \\ &+ \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=1}^{k+1} \sum_{m=0}^{l-1} (-1)^{k-l+1} (\alpha\lambda)^{k-l+m+1} \times \\ &\times \frac{k+1}{l(k-l+1)!m!} + \\ &+ \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=1}^k \sum_{m=0}^{l-1} (-1)^{k-l} (\alpha\lambda)^{k-l+m} \frac{k}{l(k-l)!m!}. \end{aligned}$$

Найдем второй момент случайной величины π :

$$\begin{aligned} E\pi^2 &= \int_0^1 e^{-\alpha\lambda x/(1-x)} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha\lambda)^k x^{k+1} (\alpha\lambda x - kx + k)}{k!(1-x)^{k+2}} dx = \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k!} \left[\int_0^{\infty} \frac{e^{-z} z^{k+2}}{(\alpha\lambda+z)^2} dz + k \int_0^{\infty} \frac{e^{-z} z^{k+1}}{(\alpha\lambda+z)^2} dz \right]. \end{aligned}$$

Вычислим при $k \geq 1$ интеграл

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \frac{e^{-z} z^{k+2}}{(\alpha\lambda+z)^2} dz &= \int_{\alpha\lambda}^{\infty} \frac{e^{\alpha\lambda} e^{-t} (t-\alpha\lambda)^{k+2}}{t^2} dt = \\ &= e^{\alpha\lambda} \left[\int_{\alpha\lambda}^{\infty} \frac{e^{-t} (-\alpha\lambda)^{k+2}}{t^2} dt + \right. \\ &+ \int_{\alpha\lambda}^{\infty} \frac{e^{-t} (k+2)(-\alpha\lambda)^{k+1}}{t} dt + \\ &+ \left. \sum_{l=2}^{k+2} C_{k+2}^l (-\alpha\lambda)^{k-l+2} \int_{\alpha\lambda}^{\infty} e^{-t} t^{l-2} dt \right] = \\ &= (-1)^{k+2} (\alpha\lambda)^{k+1} + e^{\alpha\lambda} (-\alpha\lambda)^{k+2} Ei(-\alpha\lambda) - \\ &- e^{\alpha\lambda} (k+2) (-\alpha\lambda)^{k+1} Ei(-\alpha\lambda) + \\ &+ \sum_{l=2}^{k+2} C_{k+2}^l (-\alpha\lambda)^{k-l+2} (l-2)! \sum_{m=0}^{l-2} \frac{(\alpha\lambda)^m}{m!}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} E\pi^2 &= \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k!} \left[(-1)^{k+1} (\alpha\lambda)^k (k-\alpha\lambda) + \right. \\ &+ \left. e^{\alpha\lambda} (-\alpha\lambda)^k Ei(-\alpha\lambda) ((\alpha\lambda)^2 + 2\alpha\lambda - k(k+1)) + \right. \end{aligned}$$

$$+ \sum_{l=2}^{k+2} C_{k+2}^l (-\alpha\lambda)^{k-l+2} (l-2)! \sum_{m=0}^{l-2} \frac{(\alpha\lambda)^m}{m!} + k \sum_{l=2}^{k+1} C_{k+1}^l (-\alpha\lambda)^{k-l+1} (l-2)! \sum_{m=0}^{l-2} \frac{(\alpha\lambda)^m}{m!} \Bigg].$$

Зная первые два момента случайной величины π , легко вычислить дисперсию рассматриваемой характеристики.

Заметим, что, несмотря на громоздкий вид моментов вероятности «непотери» вызова, полученные формулы допускают несложную компьютерную реализацию, которая дает возможность вычислять моменты π для любого натурального значения параметра n . Однако, очевидно, особый интерес вызывает частный случай распределения Эрланга при $n = 1$, а именно, экспоненциальное распределение параметра обслуживания. Приведем формулы для полученных выше характеристик в этом частном случае:

$$F_{\rho}(x) = e^{-\alpha\lambda/x},$$

$$f_{\rho}(x) = \frac{\alpha\lambda e^{-\alpha\lambda/x}}{x^2}, \quad x > 0;$$

$$E\rho = \int_0^{\infty} \frac{\alpha\lambda e^{-\alpha\lambda y}}{y} dy = \infty;$$

$$F_{\pi}(x) = 1 - e^{-\alpha\lambda x/(1-x)},$$

$$f_{\pi}(x) = \frac{\alpha\lambda e^{-\alpha\lambda x/(1-x)}}{(1-x)^2}, \quad x \in (0, 1);$$

$$E\pi = 1 + \alpha\lambda e^{\alpha\lambda} Ei(-\alpha\lambda);$$

$$E\pi^2 = E\pi(2 + \alpha\lambda) - 1.$$

Представленные в статье результаты не являются полными в рамках проблематики байесовских СМО и байесовских моделей надежности даже в рамках рассмотрения систем типа $M|M|1|0$. Очевидно, что дальнейшее продвижение в рамках данной проблематики требует рассмотрения и других априорных распределений величин λ , μ и других традиционных входных параметров для СМО и восстанавливаемых устройств, которые могут представлять интерес для практики. При этом должны быть определены соответствующие распределения показателей функционирования и надежности различных типов систем (в том числе систем вида $M|G|1$, $M|M|n|0$ и др.) после их рандомизации с учетом наиболее важных для практики априорных распределений параметров.

Литература

1. Шоргин С. Я. О байесовских моделях массового обслуживания // II Научная сессия Института проблем информатики РАН: тезисы докладов. — М.: ИПИ РАН. 2005. С. 120–121.
2. Kozlov B. A., Ushakov I. A. Reliability Handbook. — Holt, Rinehart Winston, 1970.
3. D'Apice C., Manzo R., Shorgin S. Some Bayesian queueing and reliability models // Electronic J. "Reliability: Theory & Applications". Vol. 1. No. 4. December, 2006.
4. Двайт Г. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Пер. с англ. — М.: Наука, 1966. 228 с.
5. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: Наука, 1971. 1108 с.

CORRELATIONAL METHODS FOR ANALYTICAL INFORMATIONAL MODELS OF THE EARTH POLE FLUCTUATIONS DESIGN BASED ON A PRIORI DATA

I. N. Sinitsyn

IPI RAN, sinitsin@dol.ru

Modern statistical informatics methods are the basis of investigation for fundamental problem “Statistical Dynamics of the Earth Pole Rotation.” Approximate and exact correlational methods for 3–5-year analytical informational models with additive and parametric harmonic and stochastic disturbances of the Earth Pole fluctuations design are developed. Examples from informational resources “Statistical Dynamics for Earth Pole Rotation” are presented.

Keywords: Earth Pole fluctuations; analytical informational model; a priori data; correlational characteristics; correlational methods; stochastic differential equations

DEVELOPMENT OF CANONICAL INFORMATION MODELS FOR INTEGRATED INFORMATION SYSTEMS

V. N. Zakharov¹, L. A. Kalinichenko², I. A. Sokolov³, and S. A. Stupnikov⁴

¹IPI RAN, vzakharov@ipiran.ru

²IPI RAN, leonidk@synth.ipi.ac.ru

³IPI RAN, isokolov@ipiran.ru

⁴IPI RAN, ssa@ipi.ac.ru

The problem of unification of heterogeneous models of information resources representation including databases, ontologies, services, and processes for development of distributed information systems using heterogeneous information resources is considered. Special attention is drawn to the verifiable methods of information model mapping and synthesis of extensible canonical information models. An architecture of Information Model Unifier as well as an example of mapping of specific information model into canonical one are presented. A comparison of proposed methods with known approaches is provided.

Keywords: information model; information model semantics; model mapping; model mapping commutativity; canonical model; canonical model synthesis; canonical model extension; refinement; model refinement verification; information model unifier; metacompilation

STATIONARY CHARACTERISTICS OF A MULTICHANNEL QUEUING SYSTEM WITH SIMULTANEOUS REFUSALS OF SERVERS

A. V. Pechinkin¹, I. A. Sokolov², and V. V. Chaplygin³

¹IPI RAN, apechinkin@ipiran.ru

²IPI RAN, isokolov@ipiran.ru

³IPI RAN, vchaplygin@ipiran.ru

The multichannel queuing system with a semi-Markovian input flow, a phase type distribution of the servicing and simultaneously unreliable servers failure is considered. Mathematical relations allowing to calculate the main stationary characteristics of system performance are found for different versions of failure and restorations process.

Keywords: queuing system; unreliable servers

LINGUISTIC SIMULATION FOR MACHINE TRANSLATION AND KNOWLEDGE MANAGEMENT SYSTEMS

A. V. Bosov¹ and A. V. Ivanov²

¹IPI RAN, AVBosov@ipiran.ru

²IPI RAN, AIvanov@ipiran.ru

Portal solution that has been implemented in the context of RAS informatization program is considered. The elaborated architecture of informational portal is described, base requirements for software solution are discussed. The choices of informational technologies are proven.

Keywords: Internet standards; multitier architecture; web-portal; adapter; .Net technology

BAYESIAN ESTIMATION IN OBSERVATION SYSTEMS WITH MARKOV JUMP PROCESSES: GAME-THEORETIC APPROACH

A. V. Borisov

IPI RAN, ABorisov@ipiran.ru

The paper is devoted to the mutual estimation/identification problem for the finite-state Markov jump processes given both the diffusion and counting observations. The dynamic and observation equations depend on the random parameter with uncertain distribution having a known support set. An objective is a conditional expectation of some quadratic function of estimation error. The paper contains an assertion concerning saddle-point existence in the stated minimax problem. The least favorable distribution and the minimax estimate are characterized in terms of the dual optimization problem. Practical applicability of the obtained results is demonstrated by the illustrating example of TCP link status monitoring under uncertain channel characteristics.

Keywords: Wonham filter; minimax estimation; generalized quadratic criterion; Zakai equation

BAYESIAN APPROACH TO QUEUING SYSTEMS AND RELIABILITY CHARACTERISTICS

A. A. Kudryavtsev¹ and S. Ya. Shorgin²

¹M. V. Lomonosov Moscow State University, nubigena@hotmail.com

²IPI RAN, sshorgin@ipiran.ru

Bayesian approach to the statement of certain problems of the queuing theory and the reliability theory is considered. The method provides the randomization of system characteristics with regard to a priori distributions of input parameters. This approach could be used to calculate average values of performance and reliability characteristics for the large groups of systems or devices. In the paper, the review of preceding results and new results concerning a case of Erlang a priori distribution is presented.

Keywords: Bayesian approach; queuing systems; reliability; mixed distributions; modeling

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2007 г.

	Выпуск	Стр.
Батракова Д. А., Королев В. Ю., Шоргин С. Я. Новый метод вероятностно-статистического анализа информационных потоков в телекоммуникационных сетях . . .	1	40
Борисов А. В. Байесовское оценивание в системах наблюдения с марковскими скачкообразными процессами: игровой подход	2	65
Босов А. В., Иванов А. В. Программная инфраструктура информационного Web-портала	2	50
Захаров В. Н., Калиниченко Л. А., Соколов И. А., Ступников С. А. Конструирование канонических информационных моделей для интегрированных информационных систем	2	15
Захаров В. Н., Козмидиади В. А. Средства обеспечения отказоустойчивости приложений	1	14
Иванов А. В. см. Босов А. В.		
Ильин В. Д., Соколов И. А. Символьная модель системы знаний информатики в человеко-автоматной среде	1	66
Калиниченко Л. А. см. Захаров В. Н.		
Козеренко Е. Б. Лингвистическое моделирование для систем машинного перевода и обработки знаний	1	54
Козмидиади В. А. см. Захаров В. Н.		
Королев В. Ю. см. Батракова Д. А.		
Кудрявцев А. А., Шоргин С. Я. Байесовский подход к анализу систем массового обслуживания и показателей надежности	2	76
Печинкин А. В., Соколов И. А., Чаплыгин В. В. Многолинейная система массового обслуживания с конечным накопителем и ненадежными приборами	1	27
Печинкин А. В., Соколов И. А., Чаплыгин В. В. Стационарные характеристики многолинейной системы массового обслуживания с одновременными отказами приборов	2	39
Синицын И. Н. Корреляционные методы построения аналитических информационных моделей флуктуаций полюса Земли по априорным данным	2	2
Синицын И. Н. Развитие теории фильтров Пугачева для оперативной обработки информации в стохастических системах	1	3
Соколов И. А. см. Захаров В. Н.		
Соколов И. А. см. Ильин В. Д.		
Соколов И. А. см. Печинкин А. В.		
Соколов И. А. см. Печинкин А. В.		
Ступников С. А. см. Захаров В. Н.		
Чаплыгин В. В. см. Печинкин А. В.		
Чаплыгин В. В. см. Печинкин А. В.		
Шоргин С. Я. см. Батракова Д. А.		
Шоргин С. Я. см. Кудрявцев А. А.		

2007 AUTHOR INDEX

	Issue	Page
Batrakova D. A., Korolev V. Yu., Shorgin S. Ya. A New Method for the Probabilistic and Statistical Analysis of Information Flows in Telecommunication Networks	1	40
Borisov A. V. Bayesian Estimation in Observation Systems with Markov Jump Processes: Game-Theoretic Approach	2	65
Bosov A. V., Ivanov A. V. Linguistic Simulation for Machine Translation and Knowledge Management Systems	2	50
Chaplygin V. V. see Pechinkin A. V.		
Chaplygin V. V. see Pechinkin A. V.		
Ilyin V. D., Sokolov I. A. The Symbol Model of Informatics Knowledge System in Human-Automaton Environment	1	66
Ivanov A. V. see Bosov A. V.		
Kalinichenko L. A. see Zakharov V. N.		
Korolev V. Yu. see Batrakova D. A.		
Kozerenko E. B. Linguistic Simulation for Machine Translation and Knowledge Management Systems	1	54
Kozmidiady V. A. see Zakharov V. N.		
Kudryavtsev A. A., Shorgin S. Ya. Bayesian Approach to Queuing Systems and Reliability Characteristics	2	76
Pechinkin A. V., Sokolov I. A., Chaplygin V. V. Multichannel Queuing System with Finite Buffer and Unreliable Servers	1	27
Pechinkin A. V., Sokolov I. A., Chaplygin V. V. Stationary Characteristics of a Multichannel Queuing System with Simultaneous Refusals of Servers	2	39
Shorgin S. Ya. see Batrakova D. A.		
Shorgin S. Ya. see Kudryavtsev A. A.		
Sinitsyn I. N. Correlational Methods for Analytical Informational Models of the Earth Pole Fluctuations Design Based on a priori Data	2	2
Sinitsyn I. N. Development of Pugachev Filtering for Stochastic Systems	1	3
Sokolov I. A. see Ilyin V. D.		
Sokolov I. A. see Pechinkin A. V.		
Sokolov I. A. see Pechinkin A. V.		
Sokolov I. A. see Zakharov V. N.		
Stupnikov S. A. see Zakharov V. N.		
Zakharov V. N., Kalinichenko L. A., Sokolov I. A., Stupnikov S. A. Development of Canonical Information Models for Integrated Information Systems	2	15
Zakharov V. N., Kozmidiady V. A. Means Providing Applications Fault Tolerance	1	14

Правила подготовки рукописей статей для публикации в журнале «Информатика и её применения»

Журнал «Информатика и её применения» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информатики и ее приложений. Журнал издается на русском языке. Тематика журнала охватывает следующие направления:

- теоретические основы информатики;
- математические методы исследования сложных систем и процессов;
- информационные системы и сети;
- информационные технологии;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных комплексов и сетей.

1. В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Публикация не должна нарушать закон об авторских правах. Направляя свою рукопись в редакцию, авторы автоматически передают учредителям и редколлегии неисключительные права на издание данной статьи на русском языке и на ее распространение в России и за рубежом. При этом за авторами сохраняются все права как собственников данной рукописи. В связи с этим авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме: Соглашение о передаче права на публикацию:

«Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи « _____ », передаем учредителям и редколлегии журнала «Информатика и её применения» 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 авторского права других лиц или организаций. Подписи авторов: (ф. и. о., дата, адрес)».

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности опубликования представленной статьи в открытой печати.

2. Статья подписывается всеми авторами. На отдельном листе представляются данные автора (или всех авторов): фамилия, полное имя и отчество, телефон, факс, e-mail, почтовый адрес. Если работа выполнена несколькими авторами, указывается фамилия одного из них, ответственного за переписку с редакцией.
3. Редакция журнала осуществляет самостоятельную экспертизу присланных статей. Возвращение рукописи на доработку не означает, что статья уже принята к печати. Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.
4. Решение редакционной коллегии о принятии статьи к печати или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия не обязуется направлять рецензию авторам отклоненной статьи.
5. Корректур статей высылаются авторам для просмотра. Редакция просит авторов присылать свои замечания в кратчайшие сроки.
6. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки. Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху — 2, снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3. Основной текст: стиль — «Обычный»: шрифт Times New Roman, размер 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине. Рекомендуемый объем рукописи — не свыше 25 страниц указанного формата. Ознакомиться с шаблонами, содержащими примеры оформления, можно по адресу в Интернете: <http://www.ipiran.ru/journal/template.doc>.
7. К рукописи, предоставляемой в 2-х экземплярах, обязательно прилагается электронная версия статьи (как правило, в форматах MS WORD (.doc) или LaTeX (.tex), а также — дополнительно — в формате .pdf) на дискете, лазерном диске или по электронной почте. Сокращения слов, кроме стандартных, не применяются. Все страницы рукописи должны быть пронумерованы.
8. Статья должна содержать следующую информацию на русском и английском языках: название, Ф.И.О. авторов, места работы авторов и их электронные адреса, аннотация (не более 100 слов), ключевые слова. Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в порядке их первого упоминания. Все фамилии авторов, заглавия статей, названия книг, конференций и т. п. даются на языке оригинала, если этот язык использует кириллический или латинский алфавит.

9. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.
10. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:
- указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
 - использовать attach (присоединение);
 - в случае больших объемов информации возможно использование общеизвестных архиваторов (ZIP, RAR);
 - в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.
11. Журнал «Информатика и её применения» является некоммерческим изданием, и гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции: Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ИПИ РАН
Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05 E-mail: rust@ipiran.ru

Выпускающий редактор Т. Торжкова
Технический редактор Л. Кокушкина
Художественный редактор М. Седакова
Сдано в набор 25.10.07. Подписано в печать 03.12.07. Формат 60 x 84 / 8
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 11. Уч.-изд. л. 11,5. Тираж 200 экз.

Заказ № 2180

Издательство «ТОРУС ПРЕСС», Москва 121614, ул. Крылатская, 29-1-43
torus@torus-press.ru; <http://www.torus-press.ru>

Отпечатано в ППП «Типография «Наука» с готовых диапозитивов
Москва 121099, Шубинский пер., д. 6.